

**APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO CONCEPTUAL NAM.
PRECIPITACION – ESCORRENTIA EN LA CUENCA DEL RIO DE ORO**

Miguel Ramón Acosta Alvarez

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2006**

**APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO CONCEPTUAL NAM.
PRECIPITACION – ESCORRENTIA EN LA CUENCA DEL RIO DE ORO**

Miguel Ramón Acosta Alvarez

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director:

**Jorge Alberto Guzmán Jaimes
Ingeniero Civil M.Sc**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias Físico Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2006**

A Dios, Por el regalo máspreciado que me ha dado "La Vida"

*A mis Padres Roberto y Marceluy, gracias por que todo lo que soy en la vida se los
debo a Uds. , los amo muchisimo.*

*A mis hermanos Javier, Elizabeth y Gina, gracias por su apoyo y su amor, los
quiero mucho hermanitos.*

A Lorena, gracias por ser incondicional y estar allí cuando te he necesitado, te amo.

A toda mi familia, por su apoyo.

Miguel Ramon.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Civil, por brindarme la oportunidad de realizar una excelente formación profesional.

Al Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático – GPH, por todo el aporte técnico necesario para la realización de la tesis de grado.

Al Ingeniero Civil, MSc. Jorge Guzman Jaimes, Director de tesis, por su valiosa ayuda y orientación acertada para la culminación exitosa del presente estudio.

A mis compañeros de camino y lucha: Adriana Ojeda y Diego López, por su amistad, ayuda y colaboración en la realización de una gran parte del proyecto.

A la entidades: IGAC, IDEAM y CDMB, por su invaluable contribución a la realización del proyecto al facilitarnos la información técnica básica necesaria utilizada en el presente estudio.

CONTENIDO

<u>1</u>	<u>INTRODUCCION.....</u>	<u>1</u>
<u>1</u>	<u>DESCRIPCION GENERAL DE LA CUENCA DE RIO DE ORO.....</u>	<u>4</u>
1.1	LOCALIZACION:.....	4
1.2	GENERALIDADES DE LA CUENCA.	7
1.3	PRECIPITACION EN LA CUENCA.	8
<u>2</u>	<u>ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION.</u>	<u>10</u>
2.1	INFORMACION DISPONIBLE.	10
2.1.1	INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA.	11
2.1.2	INFORMACIÓN DE CAUDALES.	11
2.2	MODELO DIGITAL DE ELEVACION – DEM.....	12
2.3	PRECIPITACION.....	15
2.4	EVAPOTRANSPIRACION.	19
2.4.1	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS PUROS.	20
2.4.2	GENERACIÓN DE DATOS FALTANTES.	30
2.4.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL DE REFERENCIA.	37
2.4.4	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.	41
2.4.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL.	46
2.5	DATOS DE CAUDALES.....	48
<u>3</u>	<u>MODELO CONCEPTUAL PRECIPITACION – ESCORRENTIA NAM.....</u>	<u>53</u>
3.1	MODELO NAM.	56
3.2	ESTRUCTURA DEL MODELO.....	58
<u>4</u>	<u>APLICACIÓN, CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO.....</u>	<u>67</u>
4.1	APLICACIÓN DEL MODELO.	67
4.2	CALIBRACION.....	68
4.2.1	PARÁMETROS DE LA CALIBRACIÓN.	68

4.2.2	DATOS DE CONTROL.....	69
4.2.3	CONTROL DE LA CALIBRACIÓN.....	70
4.3	VALIDACION DEL MODELO.....	73
	<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>81</u>
	<u>RECOMENDACIONES.....</u>	<u>82</u>
	<u>BIBLIOGRAFIA.....</u>	<u>83</u>
	<u>ANEXOS:.....</u>	<u>85</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización de la Cuenca del Río de Oro.	5
Figura 1.2 Subcuencas hidrográficas del Río de Oro.	6
Figura 2.1 Ubicación de las Estaciones Hidroclimáticas.	11
Figura 2.2 Esquema de las Planchas Cartográficas IGAC.	13
Figura 2.3 DEM-3D de la cuenca Río de Oro con GRID de 50 x 50 mts.	15
Figura 2.4 Matriz de datos Precipitación diaria (Spell-SDM).	17
Figura 2.5. Series de Tiempo de Precipitación Diaria por Cuenca y Subcuencas. 18	
Figura 2.5 Series de Tiempo de Precipitación Diaria por Cuenca y Subcuencas.Continuación.	19
Figura 2.6. Inconsistencias en los datos puros, Presión – estación Centro.	21
Figura 2.7. Inconsistencias en los datos puros, Presión – estación PTAR.	21
Figura 2.8. Inconsistencias en los datos puros, Humedad Relativa – estación UIS.	22
Figura 2.9. Inconsistencias en los datos puros, Humedad Relativa – estación PTAR.	22
Figura 2.10. Inconsistencias en los datos puros, Humedad Relativa – estación PTAR.	22
Figura 2.11. Inconsistencias en los datos puros, Presión – estación PTAR.	23
Figura 2.12. Datos de Presión generados.	32
Figura 2.13. Datos de Temperatura generados.	33
Figura 2.14. Datos de Radiación Solar generados.	34
Figura 2.15. Datos de Humedad Relativa generados.	35
Figura 2.16. Datos de Velocidad del viento generados.	36
Figura 2.17. Esquema de los Usos del Suelo de la Cuenca del Río de Oro.	44
Figura 2.18. Series de Tiempo de Evapotranspiración Diaria por Cuenca y Subcuencas.	45
Figura 2.18. Series de Tiempo de Evapotranspiración Diaria por Cuenca y Subcuencas. Continuación.	46
Figura 2.19. Series de Tiempo de la Evapotranspiración Real.	47
Figura 2.20. Series de Tiempo de datos puros de las estaciones Café Madrid y Majadas.	48

Figura 2.21. Series de Tiempo de Caudales de la Estación Majadas con datos faltantes entre los años 2002 – 2004.	49
Figura 2.22. Series de Tiempo de Caudales generados de las Estaciones Café Madrid y Majadas entre los años 2002 – 2004.....	50
Figura 2.23. Serie de tiempo de caudales diarios estimada para la cuenca del Río de Oro.	51
Figura 3.1. Interacción de los procesos hidrológicos.....	53
Figura 3.2 Estructura del modelo NAM.	59
Figura 4.1. Esquema Hidráulico del Río de Oro para la aplicación del modelo por Subcuencas.	68
Figura 4.2. Serie de tiempo de Caudales vs Precipitación del año 2004.	70
Figura 4.3. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la calibración a nivel de cuenca.	71
Figura 4.4. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la calibración a nivel de Subcuencas.	72
Figura 4.5. Serie de tiempo de Caudales vs Precipitación del año 2002.	73
Figura 4.6. Serie de tiempo de Caudales vs Precipitación del año 2003.	74
Figura 4.7. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de cuenca para el año 2002.....	74
Figura 4.8. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de cuenca para el año 2003.....	75
Figura 4.9. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de subcuenca para el año 2002.....	75
Figura 4.10. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de subcuenca para el año 2003.....	76
Figura 4.11. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2004 a nivel de cuenca.	78
Figura 4.12. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2003 a nivel de cuenca.	78
Figura 4.13. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de cuenca.	79
Figura 4.14. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de Subcuencas.	79
Figura 4.15. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de Subcuencas.	80

Figura 4.16. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de Subcuencas. 80

Figura A.1. Mascaras utilizadas para la espacializacion de la precipitación y la evapotranspiración en SPELL-Map..... 85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Subcuencas y Microcuencas de la Cuenca del Río de Oro.....	7
Tabla 2.1 Estaciones Hidroclimáticas utilizadas en el estudio.....	10
Tabla 2.2. Planchas Cartográficas IGAC.....	13
Tabla 2.3 Interpolador de la precipitación media anual (CSRL) del año 1970	17
Tabla 2.4. Errores presentes los datos puros en la estación Centro.	24
Tabla 2.5. Errores presentes los datos puros en la estación Chimita.....	25
Tabla 2.6. Errores presentes los datos puros en la estación PTAR.	26
Tabla 2.7. Errores presentes los datos puros en la estación UIS.....	27
Tabla 2.8. Información Hidroclimática estación Centro.	28
Tabla 2.9. Información Hidroclimática estación Chimita.	29
Tabla 2.10. Información Hidroclimática estación PTAR.	29
Tabla 2.11. Información Hidroclimática estación UIS.	30
Tabla 2.12. Clasificación de los Usos del Suelo en la Cuenca del Río de Oro.	43
Tabla 2.13. Factores de Humedad del Suelo para la Cuenca del Río de Oro.....	47
Tabla 2.14. Información de datos faltantes en las estaciones Café Madrid y Majadas.....	50
Tabla 3.1. Parámetros usados por el modelo NAM.....	66
Tabla 4.1. Parámetros calibrados por el modelo NAM. A nivel de cuenca.....	72
Tabla 4.2. Parámetros de la validación por el modelo NAM. A nivel de subcuencas.	77
Tabla 4.3. Comparación de caudales máximos y mínimos medidos y simulados.	77

RESUMEN

TITULO:

APLICACION DEL MODELO HIDROLOGICO CONCEPTUAL NAM.
PRECIPITACIÓN – ESCORRENTIA EN LA CUENCA DEL RIO DE ORO *

AUTOR:

Miguel Ramon Acosta Alvarez **

PALABRAS CLAVES: Cuenca del Río de Oro; Modelo Hidrológico; NAM; Precipitación; Escorrentía; Modelo Conceptual; Calibración; Validación.

DESCRIPCION: La presente investigación muestra la aplicación del modelo hidrológico conceptual NAM en la cuenca del Río de Oro, ubicada en la parte nor-oriental del departamento de Santander con un área aproximada de 580 Km². Nedbor Aftromings Model (NAM), es un modelo de precipitación – escorrentía que utiliza una entrada moderada de datos que consta de series de tiempo de precipitación, evapotranspiración potencial (ETpot) y caudales, en el estudio se utilizaron series históricas del periodo 2002 - 2004.

El modelo se aplicó, calibró y validó a nivel de cuenca y subcuencas, el cual representó adecuadamente las mediciones de los caudales mínimos y caudales promedios, el tiempo al pico de los hidrogramas y la curva de recesion de los mismos, pero mostró fallas con los registros de caudales máximos cuando se presentaron fuertes eventos de precipitación, además, se obtuvieron coeficientes de ajuste Nash-Sutcliffe entre 0.16 y 0.41.

El presente informe contiene la información de las estaciones y las variables hidroclimaticas utilizadas para la el calculo de las series de tiempo, se muestra la metodología de la ASCE y la FAO seguida para el calculo de la ETpot, la estructura y funcionamiento del modelo y los resultados obtenidos de la calibración y validación del modelo.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director:
Guzman Jaimes, Jorge Alberto.

ABSTRACT

TITLE:

APPLICATION OF THE CONCEPTUAL HYDROLOGICAL MODEL NAM.
RAINFALL – RUNOFF IN RIO DE ORO BASIN *

AUTHOR:

Miguel Ramon Acosta Alvarez **

KEY WORDS: Rio de Oro Basin; Hydrological Model; NAM; Rainfall; Runoff; Conceptual Model; Calibration; Validation.

DESCRIPTION: The present investigation shows the application of the conceptual hydrological model NAM in Rio de Oro basin, located in the nor-east part of the department of Santander with an approximate area of 580 Km².

Nedbor Aftromings Model (NAM), it is a rainfall – runoff model that uses a moderate entrance of data that consists of rainfall time series, potential evapotranspiration (ET_{pot}) and flows, in the study the historical series of the period 2002 - 2004 were used.

The model was applied, calibrated and validated to basin and sub-basins level, which represented the mensurations of the minimum flows and flows averages appropriately, the time to the pick of the hydrogram and the curve of recession of the same ones, but it showed failure with the registrations of maximum flows when strong precipitation events were presented, also, the adjusting coefficients Nash-Sutcliffe was obtained between 0.16 and 0.41.

The report contains the information of the stations and the hydroclimatics variables utilized for calculate of the time series, it is shown the methodology of the followed ASCE and FAO for calculate of the ET_{pot}, the structure and operation of the model and the obtained results of the calibration and validation of the model.

* Graduation project.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering's, School of Civil Engineering, Director: Guzman Jaimes, Jorge Alberto.

INTRODUCCION

Los estudios de la potencialidad hídrica en el pasado y los que puedan presentarse en el presente de una determinada cuenca es importante para poder garantizar en el futuro, el abastecimiento de agua para el consumo humano, riego, etc. Además que sirve como prevención contra el riesgo que significa la presencia de eventos extremos.

Uno de los fenómenos hidrológicos que requiere un estudio adecuado es la estimación exacta de caudales diarios para poder determinar la potencialidad hídrica de la cuenca o para poder establecer el transito de grandes crecidas, debido a que en determinadas situaciones pueden poner en peligro vidas humanas y generar importantes daños materiales.

En este aspecto, a pesar que la corporación para el cuidado de la meseta de Bucaramanga (CDMB) y el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) han venido instrumentando la cuenca del río de oro y cuentan con varios años de registros de variables hidrometereológicas y limnigráficas, el grado de instrumentación de la cuenca no nos permite disponer de una información hidrometereológica apropiada para realizar estudios hidrológicos que nos puedan llevar a predecir con exactitud el comportamiento de la cuenca ante cierto evento de precipitación o escorrentía.

En consecuencia, la búsqueda de otros medios para ayudar al mejoramiento de predicción que se le pueda dar a la cuenca del río de oro es importantísima y muy necesaria. Por tal motivo, el sistema de modelamiento hidrológico, se convierte en una herramienta muy útil en la solución de este problema. Poder modelar con cierta precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca del río de oro, podrá darnos una idea muy acertada del comportamiento de los caudales diarios en la cuenca al presentarse eventos de precipitación o escorrentía de magnitudes

importantes y poder de esta forma tomar medidas de control o generar mayores aprovechamientos del recurso hídrico.

En la mayoría de los casos cuando ocurre un evento de precipitación gran parte del agua precipitada se convierte en escorrentía superficial que se ve reflejada en los aumentos de los caudales de las corrientes de agua como son los ríos y arroyos.

Poder conocer la serie de tiempos de caudales en una cuenca ante un evento de lluvia es un dato muy importante y que suele presentar gran dificultad para su obtención, por ende uno de los mecanismos de estimación mas usuales es la modelación precipitación escorrentía.

En la actualidad en la cuenca del Río de Oro no se cuenta con registros históricos de series de tiempo de caudales confiables, por lo cual la aplicación de estos modelos para la generación de dichas series temporales es un primer paso para lograr establecer el conocimiento del comportamiento de la cuenca en la relación de un evento de precipitación y escorrentía superficial.

La información que tenemos sobre los datos hidrológicos sobre la cuenca del Río de Oro es limitada y muy puntualizada, es decir se conocen muy pocos registros en la cuenca y no están especializados en toda su extensión, por el contrario solo tenemos datos en muy pocos puntos los cuales no alcanzan a ser representativos y nos generan mucha incertidumbre a la hora de realizar estudios porque realmente no hay registros.

Los modelos matemáticos conceptuales que relacionan directamente los eventos de precipitación con una escorrentía superficial son una herramienta aceptable para poder empezar a realizar las series de tiempo de caudales con las cuales no cuenta la cuenca del Río de Oro y establecer de esta manera unos primeros

registros que nos ayuden a crear un buen precedente a la información que se debe tener en la cuenca hidrográfica para posteriores estudios.

1 DESCRIPCION GENERAL DE LA CUENCA DE RIO DE ORO.

En el presente capitulo se realizara una breve descripción general de la cuenca del Río de Oro; debido a que esta región conforma la zona de estudio del presente proyecto.

1.1 LOCALIZACION:

El presente proyecto tiene como marco de desarrollo la cuenca del Río de Oro ubicada en el departamento de Santander (Colombia).

La cuenca del Río de Oro pertenece al sistema de subcuencas que conforman la Cuenca Superior del Río Lebrija, y se localiza en el extremo nordeste del departamento de Santander, sobre la vertiente occidental de la cordillera oriental, entre las coordenadas $6^{\circ}55'$ y $7^{\circ}27'$ de latitud norte y $75^{\circ}51'$ y $73^{\circ}18'$ de longitud oeste de Greenwich y coordenadas Gausianas 1'095.000 a 1'125.000 Este y 1'255.500 a 1'284.000 Norte, con origen en Bogotá, (ver figura 1.1). Posee alturas sobre el nivel del mar que van desde los 3600 m.s.n.m. en el alto El Picacho, hasta los 600 m.s.n.m. en el sector de Café Madrid en la desembocadura del Río de Oro al Río Suratá.

La subcuenca del Río de Oro limita al norte con la subcuenca del Río Suratá y la micro cuenca del Río Tona afluente del anterior, al nororiente con las cuencas del Río Jordán (Cuenca del Río Arauca) y Manco (Subcuenca del Río Chicamocha); al sur occidente con la Subcuenca del Río Sogamoso y al occidente con la Microcuenca de la Quebrada la Angula (C.D.M.B., 2003).

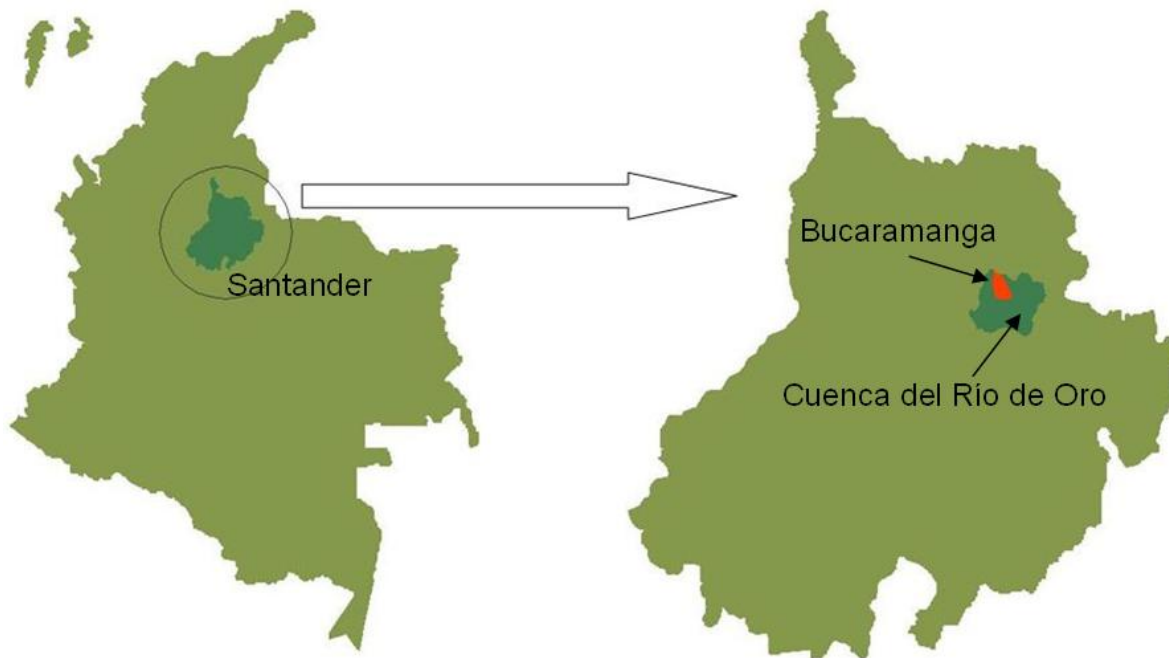


Figura 1.1 Localización de la Cuenca del Río de Oro.

La cuenca del Río de Oro con un área aproximada de 59.874 Ha hace parte del sistema de subcuencas del río Lebrija (aprox. 47% del área C.S.R.L.).

En ella están ubicadas las cabeceras de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón. La cuenca se divide a su vez en las subcuencas del Río Frío, Río de Oro bajo y Río de Oro alto (conformado por la unión de los ríos de Lato y Oro). En la figura 1.2 se muestra la subdivisión de la cuenca del río de Oro por subcuencas.

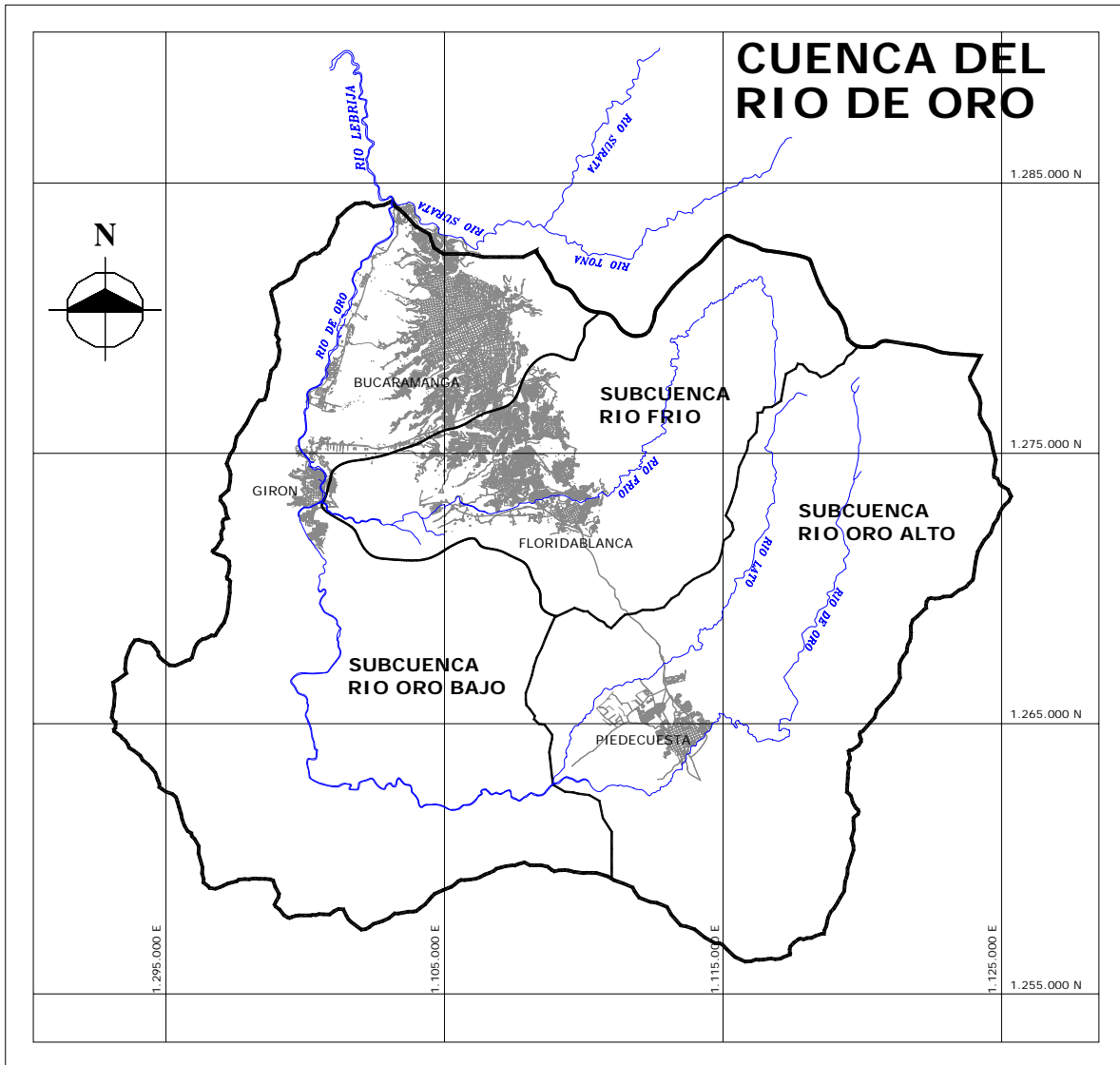


Figura 1.2 Subcuencas hidrográficas del Río de Oro.

Fuente: CERS (Guzmán et al, 2003) y modificado por el Autor (2006).

Cada uno de los sistemas de subcuencas mencionadas anteriormente se subdivide a su vez en los siguientes sistemas de microcuencas:

Río Frío: Compuesta por las microcuencas Aranzoque (3550 Has), Frío Alto (5352 Has), Frío Bajo (1926 Has) y Zapamanga (1396 Has).

Río de Oro Alto: Compuesta por las microcuencas Oro Alto Alto (3975 Has), Oro Alto Medio (2819 Has), Oro Alto bajo (3977 Has), Pilas (4967 Has), Rasgón (1449 Has) y Río Lato (5677 Has).

Río de Oro Bajo: Compuesta por las microcuencas Grande (1910 Has), Oro Bajo Alto (6861 Has), Oro Bajo Medio (6948 Has), Oro Bajo Bajo (2571 Has), Palmar (2325 Has) y Ruitoque (2490 Has), (Izasa, 2004).

La siguiente tabla describe la subdivisión de la cuenca del Río de Oro por subcuencas y esta a su vez por microcuencas.

Tabla 1.1 Subcuencas y Microcuencas de la Cuenca del Río de Oro.

SUBCUENCA	MICROCUENCAS	CORRIENTES PRINCIPALES	AREA (Km²)
Río Frío	Aranzoque, Frío Alto, Frío Bajo y Zapamanga.	Río Frío	128
Río de Oro Alto	Oro Alto Alto, Oro Alto Medio, Oro Alto bajo, Pilas, Rasgón y Río Lato.	Río de oro. Río Lato.	208
Río de Oro Bajo	Grande, Oro Bajo Alto, Oro Bajo Medio, Oro Bajo Bajo, Palmar y Ruitoque.	Río de Oro: unión de los ríos Oro y Lato	263

1.2 GENERALIDADES DE LA CUENCA.

El Río de Oro nace a una altura de 3500 m.s.n.m. con aportes de cauces conocidos como la Maquina, Cola de Pato y La Lejía entre otros. Sobresale como punto de referencia (divisoria de aguas) el sitio conocido como El Picacho, localizado en el kilómetro 50 de la Vía Bucaramanga – Pamplona (C.D.M.B., 2003). El Río de Oro corre inicialmente al sur, gira en forma de U cambiando su dirección al norte, aguas abajo del área urbana del municipio de Piedecuesta, el

río recibe a la quebrada Grande, quebrada Soratá y el río Lato. En la zona del municipio de Girón recibe las aguas del río Frío, quebrada la iglesia, quebrada Chimita y las corrientes de la escarpa de la meseta de Bucaramanga; para luego unirse con el Río Suratá para formar el Río Lebrija.

El relieve presenta un sector nororiental montañoso con paisaje de cordillera y fuertes pendientes, separado por la falla de Bucaramanga, de una zona sur-occidental conformada por plataformas con topografía suave y ondulada en estado avanzado de erosión. Este relieve montañoso y variado crea una gran cantidad de microclimas, siendo la altura promedio 1735 m.s.n.m., la temperatura media es de 18 °C, y la precipitación media multianual; de acuerdo a la distribución de isoyetas de 1475 mm. El 50% del área se encuentra dentro del piso premontano o clima medio, el 35% se ubica dentro de la vida del bosque húmedo premontano, y el 15% dentro de la zona de vida de bosque húmedo montano bajo.

Por ser parte de la cuenca del río Lebrija, podría considerarse como buena productora de agua. Sin embargo, lo montañoso del territorio, las fuertes pendientes, la deforestación y la gran actividad humana que allí se desarrolla, no permite el adecuado almacenamiento del agua, ni su disponibilidad con buena calidad. Este hecho agravado además por el excesivo arrastre de sedimentos desde las partes más altas (subcuenca del río de oro alto). (CDMB, 1991)

1.3 PRECIPITACION EN LA CUENCA.

En la zona se presenta un sistema bimodal de lluvias con dos periodos secos y dos periodos húmedos, intercalados durante el año, fuertemente influenciado por el movimiento de la zona de convergencia intertropical. El periodo seco inicia a finales de Diciembre y finaliza a finales de Marzo, mientras el segundo inicia a finales de Junio y finaliza a mediados de Septiembre.

La precipitación es de tipo orográfico y convectivo. Las masas de nubes viajan desde el valle del Magdalena medio hacia el oriente, donde la mesa de Lebrija (1100 m.s.n.m.) actúa a manera de cortina ocasionando que únicamente las masas altas de nubes saturadas logren superarlo. Estas masas de nubes al encontrarse con la cordillera oriental, producen mayor pluviosidad, mientras que la zona inferior del Río de Oro permanece seca.

El óptimo pluviométrico en la zona se encuentra alrededor de la cota 1800 m.s.n.m. (Mendoza y Sandoval, 2002).

2 ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION.

2.1 INFORMACION DISPONIBLE.

La información que se utilizó en el presente proyecto pertenece a las entidades: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y a la Corporación para el Cuidado de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). La cual fue suministrada por el Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH), que es un grupo de investigación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Los datos utilizados son de tipo hidrológico, topográfico y climatológico:

Las estaciones climáticas utilizadas fueron: Centro, Chimita, PTAR y UIS y fueron facilitadas por la CDMB, las planchas cartográficas a escala 1:25000, fueron facilitadas por el IGAC y las estaciones hidrológicas Café Madrid y Majadas, fueron facilitadas por el IDEAM. En la tabla 2.1, se presenta una pequeña descripción de las estaciones hidroclimáticas utilizadas.

Tabla 2.1 Estaciones Hidroclimáticas utilizadas en el estudio.

ESTACION	OPERADOR	VARIABLE	COORDENADAS		ALTURA (msnm)	TIPO	RESOLUCION TEMPORAL
			NORTE	ESTE			
Centro	CDMB	CLIMATICA	1279070	1105857	971.43	DIGITAL	1 hr.
Chimita	CDMB	CLIMATICA	1276796	1100617	685.84	DIGITAL	1 hr.
PTAR	CDMB	CLIMATICA	1273129	1104803	764	DIGITAL	1 hr.
UIS	CDMB	CLIMATICA	1281485	1105545	995.28	DIGITAL	1 hr.
Café Madrid	IDEAM	HIDROLOGICA	1284360	1102861	600	MIXTO	15 min.
Majadas	IDEAM	HIDROLOGICA	1283520	1107706	760	MIXTO	1 hr.

2.1.1 Información Hidroclimática.

La información hidroclimática utilizada consistió en datos con resolución temporal horaria de temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar, presión y velocidad del viento. Comprendida entre los años 2001 a 2005, en las estaciones de Centro y Chimita, y para las estaciones PTAR y UIS solo hay información a partir del 1º febrero de 2002. En la figura 2.1, se muestra la ubicación geográfica de las estaciones utilizadas en el estudio.

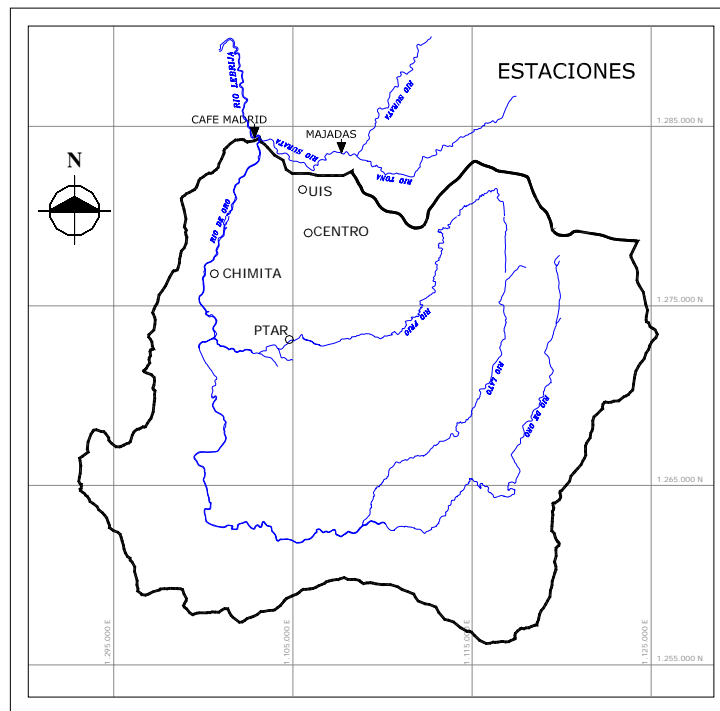


Figura 2.1 Ubicación de las Estaciones Hidroclimáticas.

2.1.2 Información de Caudales.

Los datos de caudales utilizados en el presente estudio se obtuvieron de las estaciones hidrológicas de CAFÉ MADRID ubicada a 07°10' de Latitud Norte y 73°09' de Longitud Oeste, en el cierre de la cuenca Superior del Río Lebrija,

donde se unen los ríos Suratá y Oro para formar el río Lebrija, a una altura de 600 m.s.n.m. y MAJADAS ubicada a 7°09' de latitud norte y 73°09' de longitud oeste, en la unión de los ríos Suratá y Tona para formar el río Suratá, a una altura de 760 m.s.n.m.

Los datos de caudal utilizados presentan una resolución temporal diaria y La serie de tiempo utilizada en el modelo sale de la diferencia entre los datos de la estación Café Madrid con los de Majadas.

2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACION – DEM.

Los modelos digitales de elevación DEM (de sus siglas en ingles, digital elevation model), son bases de datos geográficos que describen las diferencias en el relieve de una cuenca. Los DEM se elaboran con un software mediante interpolación de un conjunto de datos de altitud, de tal manera que, con una cierta resolución, cada porción de la cuenca recibe un cierto valor de altitud. De un DEM de una cuenca se puede derivar el trazado de cauces y parteaguas, procedimiento que comúnmente se realizaba en forma manual sobre mapas topográficos.

Mediante procedimientos matemáticos relativamente sencillos, un DEM permite la construcción de mapas de pisos altitudinales, y mapas de inclinación, orientación y forma de la pendiente de las laderas, que son importantes en los modelos de escorrentía.

Para la creación de los modelos de elevación de la cuenca y las subcuencas de Río de Oro se utilizaron planchas topográficas digitales de la zona de estudio a escala 1:25000, que pertenecen al IGAC, en archivos con formato del software autocad (.dwg) (ACAD, Autodesk®). Las planchas utilizadas se describen en la tabla 2.2 y se esquematizan en la figura 2.2

Tabla 2.2. Planchas Cartográficas IGAC.

Plancha IGAC	Coordenadas			
	Este		Norte	
	Mínimo	Máximo	Minino	Máximo
109-IV-C	1090000	1105000	1280000	1290000
109-IV-D	1105000	1120000	1280000	1290000
110-III-C	1120000	1135000	1280000	1290000
120-II-A	1090000	1105000	1270000	1280000
120-II-B	1105000	1120000	1270000	1280000
120-II-C	1090000	1105000	1260000	1270000
120-II-D	1105000	1120000	1260000	1270000
120-IV-A	1090000	1105000	1250000	1260000
120-IV-B	1105000	1120000	1250000	1260000
121-I-A	1120000	1135000	1270000	1280000
121-I-C	1120000	1135000	1260000	1270000
121-III-A	1120000	1135000	1250000	1260000

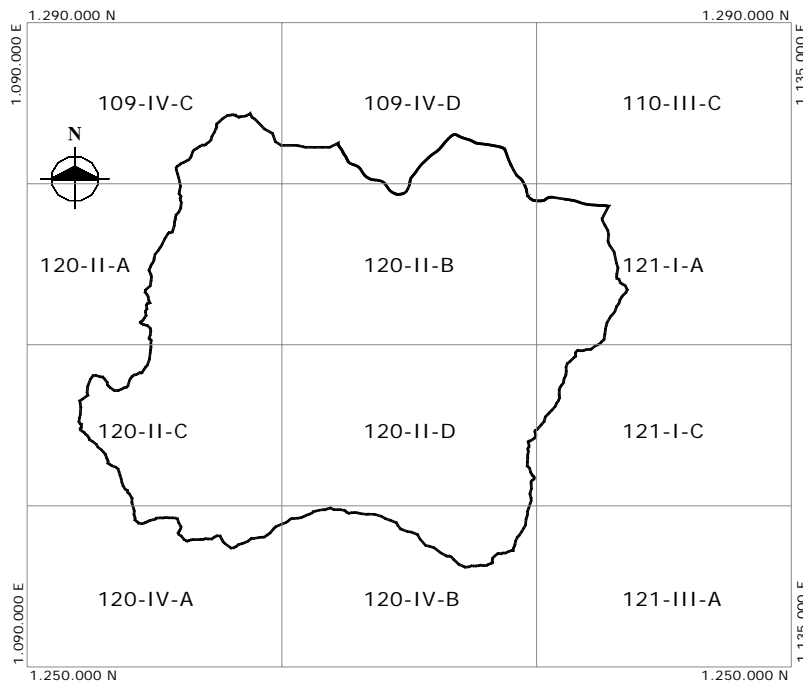


Figura 2.2 Esquema de las Planchas Cartográficas IGAC.

Lo primero que se realizó fue revisar la información contenida en las planchas a efecto de determinar inconsistencias en ellas.

Luego se procedió a unir cada una de las planchas en su lugar correspondiente, asegurándose de que las curvas de nivel no quedaran sueltas y a la altura adecuada, además se depuraron los archivos a efecto de que solo contenga la información correspondiente a la curvas de nivel, por que son las que nos van a determinar la forma del terreno.

Los DEM se crearon utilizando los programas: SURFER 8, Autocad y SPELL-Map (Guzman, 2003), y el procedimiento utilizado fue el siguiente:

- El archivo digital de Autocad que contiene las curvas de nivel se guarda como formato .dxf, este tipo de archivos contiene las coordenadas espaciales (x,y,z) de todos los puntos que conforman las polilíneas que describen las curvas de nivel.
- Con el programa SPELL-Map, se extrae la información del archivo .dxf y se guarda como un archivo de texto .txt.
- El software SURFER 8, lee el archivo .txt creado y mediante un método de interpolación y utilizando celdas de 50x50 metros, el programa procesa el modelo de elevación. El tipo de archivos con que trabaja el SURFER es .GRD.

El método de interpolación utilizado fue el Radial Basis Funtion, con Basis Funtion: Natural Cubic Spline y $R^2=20'000000$, por que este fue el que mejor se ajustó a la forma del terreno.

- Para obtener el área de la cuenca del Río de Oro, fue necesario cargar el archivo con SPELL-Map, esto por que el programa permite corregir los errores en el llenado de la grilla (PITS). Con el modelo corregido se separo el área de la cuenca del resto del modelo, de esta manera se crean las mascararas de la cuenca y subcuencas del Río de Oro (ver anexo A).

Las mascarar obtenidas nos servirán para realizar la especialización de la precipitación y la evapotranspiración, para obtener las serie de tiempo.

- Por ultimo las mascarar obtenidas se convirtieron a un archivo que sea compatibles con SURFER para obtener el DEM de la cuenca mostrado en la figura 2.3.

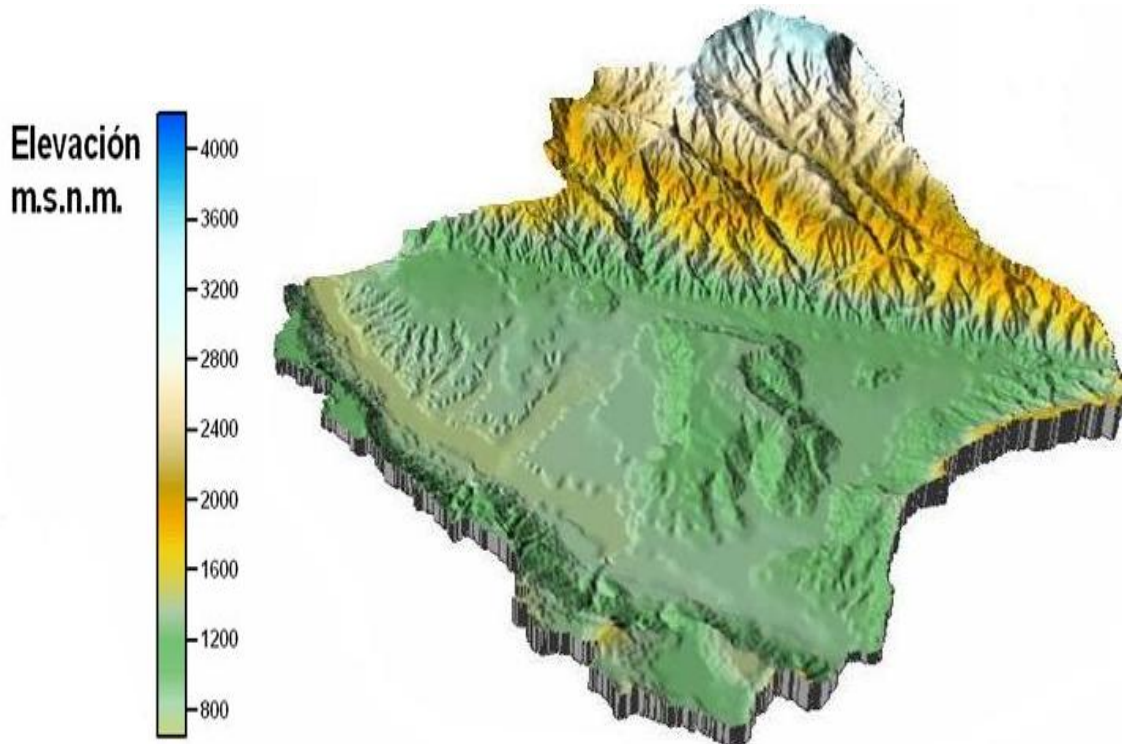


Figura 2.3 DEM-3D de la cuenca Río de Oro con GRID de 50 x 50 mts.

2.3 PRECIPITACION.

Para la obtención de las series de tiempo de la precipitación media diaria sobre la cuenca se utilizaron los datos de las estaciones Centro, Chimita, PTAR y UIS en el periodo comprendido entre el año 2002 y 2004. La información de la precipitación se evaluó, corrigió y se distribuyo espacialmente.

Debido a que los datos de precipitación están con resolución horaria, fue necesario calcular la precipitación diaria de cada estación para poder especializarla

El régimen de la precipitación y demás variables climáticas presentan una alta incertidumbre sobre algunas partes de la cuenca, debido a que no se posee instrumentación adecuada o se carece de ella en zonas como la parte alta de la cuenca, en la Subcuenca de Río de Oro Alto en el macizo de Bucaramanga y en la mesa de los Santos. La precipitación se estimó por medio de extrapolación espacial mediante un modelo GRID de 50x50 mts.

En el estudio realizado por Serrano y Balaguera 2006, se cita: “El método de interpolación de Kriging, en estudios anteriores, arrojo resultados aceptables en la distribución de la precipitación anual y mensual basada en información de 28 estaciones en el periodo de registro de 1986-2000 sin embargo se observo menor continuidad en la zona de mas alta pluviosidad, esto se podría mejorar teniendo mas información y aplicando otros métodos de interpolación (Maradei, Rojas, 2002).

A raíz de esto se opto por probar otros métodos de interpolación, siendo el mas acertado el método de Distancia Inversa al Cuadrado ya que este se ubicaba en el rango de valores de precipitación media multianual de la cuenca de 1217 a 1288 mm/año, (Gómez, S, Colegial, J, 2003), como se muestra en la Tabla 2.3”.

Tabla 2.3 Interpolador de la precipitación media anual (CSRL) del año 1970

Interpolador	Precipitación media multianual (mm/año)
Radial Basis	2532
IDP 2	1280
IDP 3	1403
Kriging	1050

Fuente: (Serrano y Balaguera, 2006)

El estudio de Serrano y Balaguera fue realizado en la cuenca Superior del Río Lebrija, y como el río de oro es una subcuenca del río Lebrija, entonces para el presente estudio tomaremos el método Distancia Inversa al Cuadrado como método de interpolación para realizar la espacialización de la precipitación.

La espacialización de la precipitación se realizó utilizando los programas Surfer y Spell-SDM.

Inicialmente se organizaron los datos en forma matricial utilizando Spell-SDM, relacionando las estaciones con su respectiva precipitación, tal como lo muestra la figura 2.4 que nos muestra una parte de la matriz formada. Luego el Spell-SDM generó los archivos de texto (1096 archivos .txt) que nos servirán para realizar la espacialización en Surfer.

DATE	CENTRO	CHIMTA	PTAR	UIS
38047	0	0	1.8	0
38048	0	0	0	0
38049	0	0	0	0.1
38050	0	0	0	8
38051	0	0	0	0
38052	0	0	1.8	0
38053	0	0	0.2	0
38054	0	0	0.4	0.2
38055	0	0	0	8
38056	0	0	0	2.1
38057	0	0	0	0

Figura 2.4 Matriz de datos Precipitación diaria (Spell-SDM).

En la figura 2.5, se muestran la distribución temporal de la espacialización de la precipitación diaria estimada para la cuenca y las subcuencas del río de oro descritas en la figura 1.2.

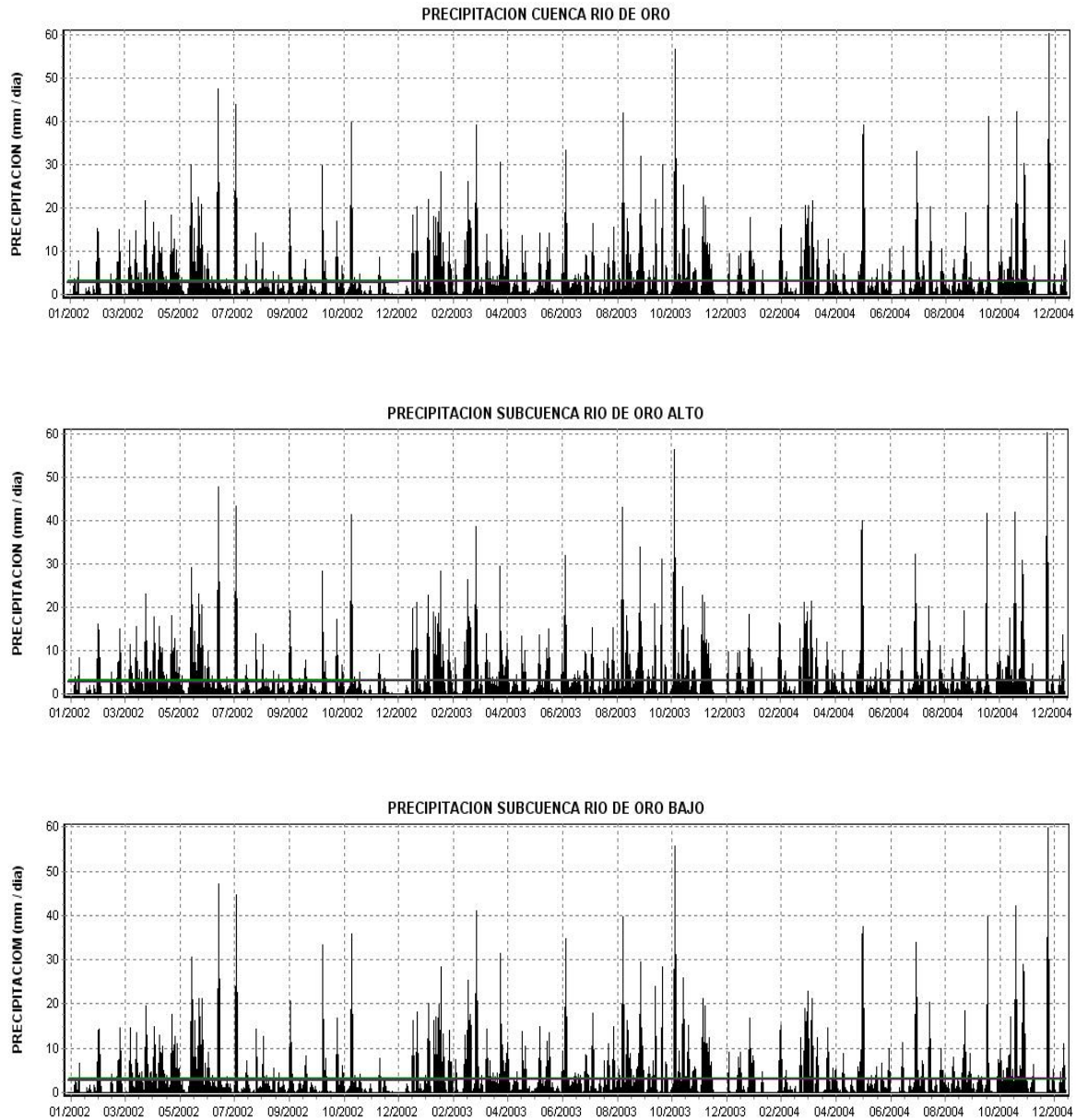


Figura 2.5. Series de Tiempo de Precipitación Diaria por Cuenca y Subcuencas.

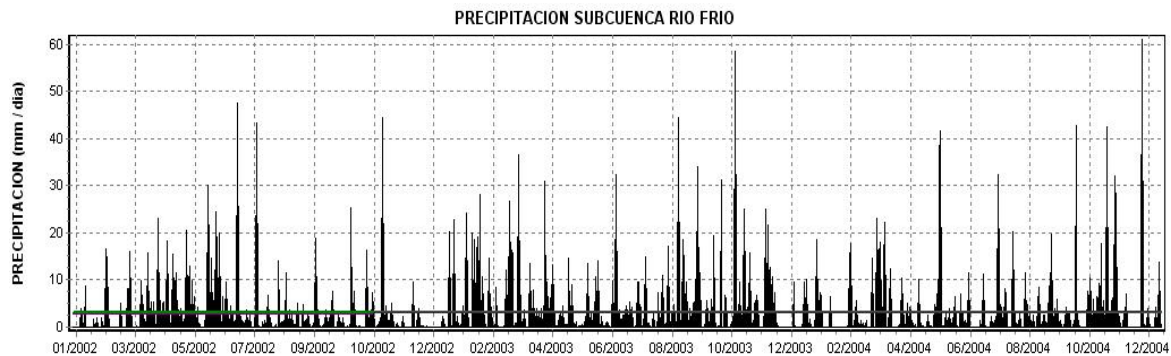


Figura 2.5 Series de Tiempo de Precipitación Diaria por Cuenca y Subcuencas.Continuación.

2.4 EVAPOTRANSPIRACION.

La evapotranspiración es la consideración de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración, los cuales, en realidad ocurren simultáneamente.

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a estado gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. La transpiración es el proceso físico-biológico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso a través del metabolismo de las plantas y pasa a la atmósfera.

Para el presente estudio se considerará la evapotranspiración como la suma conjunta de los dos procesos, tanto de la evaporación desde el suelo como la transpiración desde las plantas.

Existen dos tipos de evapotranspiración: la evapotranspiración potencial (ET_{pot}) y la evapotranspiración real (ET_{real}). La evapotranspiración potencial, tiene lugar cuando existen condiciones óptimas de desarrollo vegetal y cuando la humedad del suelo está a la capacidad de campo. Por el contrario, la evapotranspiración real, es la que se produce realmente en las condiciones existentes en cada caso en particular. Es evidente que la evapotranspiración potencial es mayor que la

evapotranspiración real. Serán iguales siempre que la humedad del suelo sea óptima y que exista un buen desarrollo vegetal (García, Otero, 2005).

Para la estimación de la evapotranspiración se utilizó la metodología de la American Society of Civil Engineers (ASCE) y la ecuación de Penman – Monteith, con resolución temporal horaria (la evapotranspiración se calculó a nivel horario, pero para la aplicación del modelo se utilizaron valores diarios), a partir de las variables climáticas: Presión atmosférica (mbar), Temperatura (°C), Velocidad del Viento (m/seg), Radiación Solar (W/m^2) y Humedad Relativa (%).

Los datos se tomaron de las estaciones Centro, Chimita, PTAR y UIS.

2.4.1 Procesamiento de los Datos Puros.

Las series de tiempo hidrológicas están caracterizadas por dos componentes: la componente determinística y la componente estocástica. La componente determinística está caracterizada por presentar tendencia y periodicidad (variaciones temporales y cíclicas). La tendencia es causada por inconsistencia y no-homogeneidad en la serie de tiempo. La no-homogeneidad resulta de cambios naturales o antrópicos en el ambiente durante el periodo de registro. Cambios climáticos y cambios en el uso del suelo pueden causar no-homogeneidad en la serie de tiempo. Por otro lado, las inconsistencias resultan de los cambios en la cantidad de errores sistemáticos asociados a la medición de los datos durante los periodos de observación. Las inconsistencias pueden ser atribuidas a los errores de lectura y registros por parte del observador, fallas en los instrumentos y cambios en el procedimiento y lugar de calibración (Serrano, Balaguera, 2006).

Las series de tiempo hidrológicas de cada una de las variables utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración fueron valoradas, corregidas y completadas a

efecto de no tener inconsistencias y datos faltantes en las series. La única variable que se trabajó con datos faltantes fue la precipitación.

A continuación se presentan una serie de graficas que ilustran las inconsistencias más relevantes presentadas por la información de los datos puros y que luego fue corregida.



Figura 2.6. Inconsistencias en los datos puros, Presión – estación Centro.

En la figura se observan varios segmentos de la serie de tiempo con diferencia en la media y en varianza.

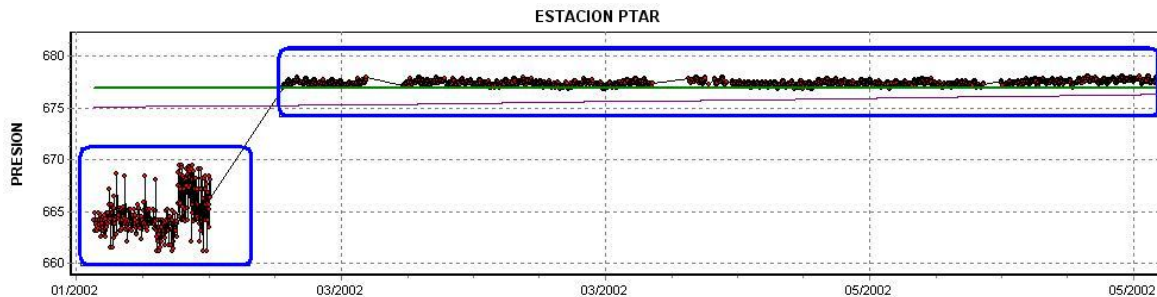


Figura 2.7. Inconsistencias en los datos puros, Presión – estación PTAR.

Al igual que la grafica anterior aquí podemos observar el cambio notorio en la media y en la varianza de dos segmentos de la serie de tiempo, además existen espacios vacíos entre la serie lo que indica la existencia de datos faltantes.

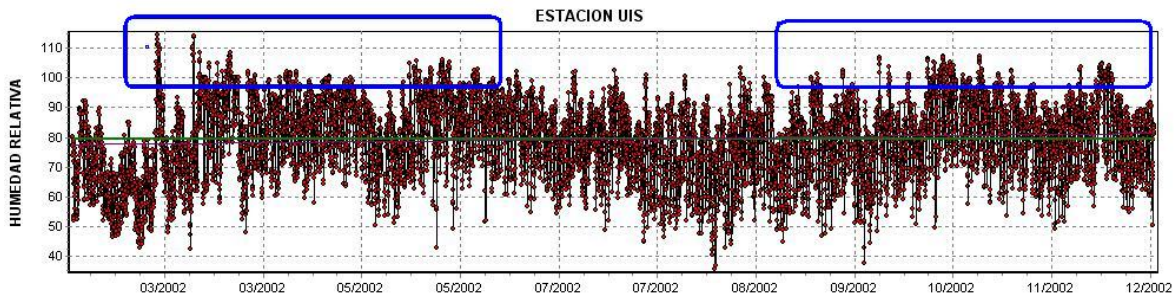


Figura 2.8. Inconsistencias en los datos puros, Humedad Relativa – estación UIS.

En esta figura de la humedad relativa en la estación UIS podemos apreciar que algunos datos sobrepasan el valor del 100%. También se nota la estacionalidad y periodicidad en la serie de tiempo del año 2002.

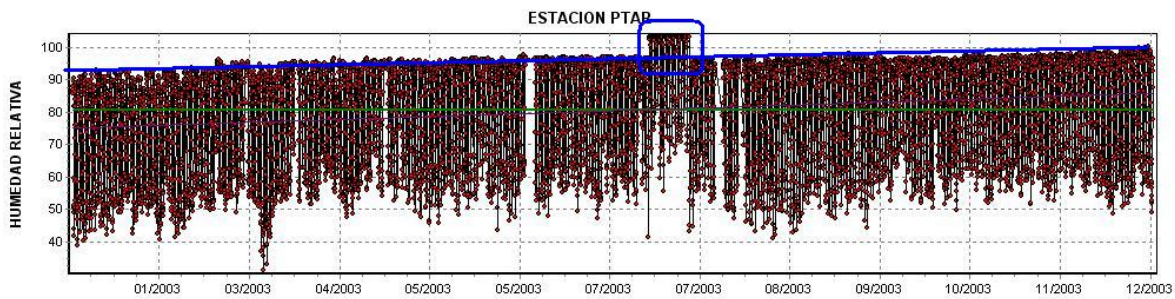


Figura 2.9. Inconsistencias en los datos puros, Humedad Relativa – estación PTAR.

En la figura podemos denotar la tendencia creciente que experimentan los datos al igual que se presenta un cambio notorio en la media en una porción de la serie.

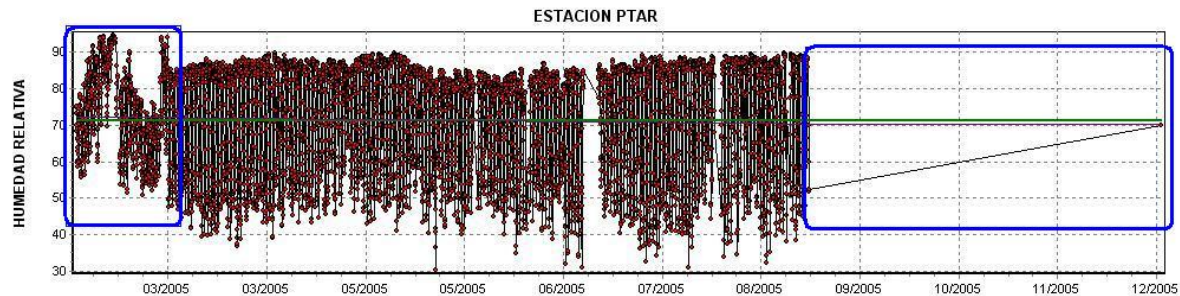


Figura 2.10. Inconsistencias en los datos puros, Humedad Relativa – estación PTAR. En esta grafica podemos apreciar la notoriedad de datos faltantes y el cambio en la media y la varianza de la serie de tiempo.

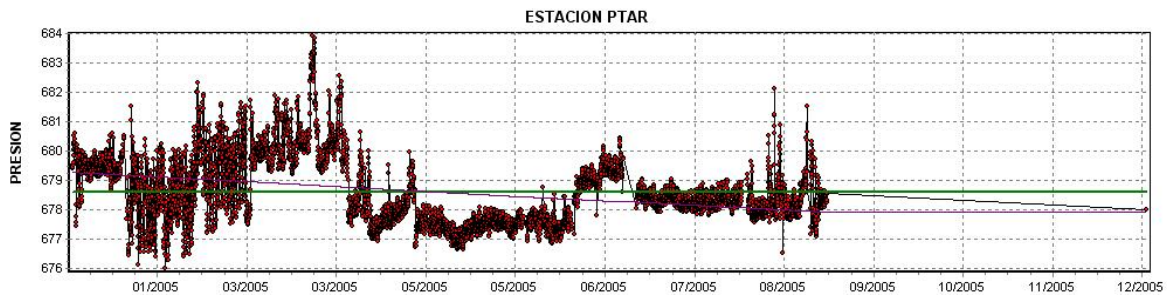


Figura 2.11. Inconsistencias en los datos puros, Presión – estación PTAR.

Por ultimo en esta grafica observamos que la serie de tiempo presenta valores de datos de presión imposibles arreglar, debido a su inconsistencia y falta de homogeneidad. En este caso se decidió no contar con estos datos y optar por determinar la serie completa como datos faltantes.

En las siguientes tablas se presenta resumida la información concerniente a la valoración hecha a los datos puros, para mostrar las partes de las series de tiempo de las variables climáticas que presentaron errores sistemáticos en las mediciones y que luego fueron corregidas.

Para un mayor entendimiento de las tablas presentadas a continuación tenemos:

DF = Indica la presencia de datos faltantes.

CM = Indica cambio en la media.

CV = Indica un cambio en la varianza de los datos.

TD = Indica que la serie presenta una tendencia decreciente en los datos.

TC = Indica que la serie presenta una tendencia creciente en los datos.

>100 = Este es solo aplicable a la variable de humedad relativa e indica la presencia de datos mayores al 100%.

NS = Indica la presencia de datos inconsistentes que no se le pueden hacer arreglos, por lo tanto se tomaron como datos faltantes.

Tabla 2.4. Errores presentes los datos puros en la estación Centro.

AÑO	MES	VARIABLES CLIMATICAS				
		Presión	Temperatura	Radiación Solar	H. Relativa.	Vel. Viento
2002	Enero	OK	OK	OK	OK	OK
	Febrero	OK	OK	OK	OK	OK
	Marzo	TC	OK	OK	OK	OK
	Abril	TC	OK	OK	OK	OK
	Mayo	TC	OK	OK	OK	OK
	Junio	CM, CV	OK	OK	OK	OK
	Julio	NS	OK	OK	OK	OK
	Agosto	OK	OK	OK	OK	OK
	Sept.	OK	OK	OK	OK	OK
	Octubre	OK	OK	OK	OK	OK
	Nov.	OK	OK	OK	OK	OK
	Dic.	OK	OK	OK	OK	OK
2003	Enero	OK	OK	OK	TC	OK
	Febrero	OK	OK	OK	TC	OK
	Marzo	OK	OK	OK	CM-TC	OK
	Abril	NS	DF-CM-CV	DF	DF-TC	DF
	Mayo	NS	DF-NS	DF	DF-TC	DF
	Junio	NS	DF-NS	DF	DF-TC	DF
	Julio	CM-CV	DF-NS	DF	CM-TC	DF
	Agosto	OK	OK	OK	TC	OK
	Sept.	OK	OK	OK	TC	OK
	Octubre	OK	OK	OK	TC	OK
	Nov.	OK	OK	OK	TC	OK
	Dic.	OK	OK	OK	TC	OK
2004	Enero	DF	DF-CM	DF	DF-TC	DF
	Febrero	DF	DF-TD	DF	DF-CM-TC	DF
	Marzo	OK	TD	OK	TC	OK
	Abril	OK	TD	OK	TC	OK
	Mayo	OK	TD	OK	TC	OK
	Junio	OK	TD	OK	TC	OK
	Julio	OK	TD	OK	TC	OK
	Agosto	OK	TD	OK	TC	OK
	Sept.	OK	TD	OK	TC	OK
	Octubre	OK	TD	OK	TC	OK
	Nov.	OK	TD	OK	TC	OK
	Dic.	OK	TD	OK	TC	OK

Tabla 2.5. Errores presentes los datos puros en la estación Chimita.

AÑO	MES	VARIABLES CLIMATICAS				
		Presión	Temperatura	Radiación Solar	H. Relativa.	Vel. Viento
2002	Enero	CM-CV	OK	OK	CM	CM
	Febrero	CM-CV	OK	OK	CM	CM
	Marzo	OK	OK	OK	CM	OK
	Abril	OK	OK	OK	OK	OK
	Mayo	OK	OK	OK	OK	OK
	Junio	CM	DF	OK	DF	OK
	Julio	CM	OK	OK	OK	OK
	Agosto	OK	OK	OK	OK	OK
	Sept.	OK	OK	DF	OK	OK
	Octubre	OK	OK	OK	OK	OK
	Nov.	OK	OK	OK	OK	OK
	Dic.	OK	OK	OK	OK	OK
2003	Enero	CM	TD	TD	CM-TC	TD
	Febrero	CM	TD	TD	TC	TD
	Marzo	DF-CM	DF-TD	DF-TD	DF-TC	DF-TD
	Abril	OK	TD	TD	TC	TD
	Mayo	OK	TD	TD	TC	TD
	Junio	OK	DF-TD	DF-TD	DF-TC	DF-TD
	Julio	OK	TD	TD	TC	TD
	Agosto	OK	TD	TD	TC	TD
	Sept.	OK	TD	TD	TC	TD
	Octubre	OK	TD	TD	TC	TD
	Nov.	DF	DF-TD	DF-TD	DF-TC	DF-TD
	Dic.	OK	DF-TD	DF-TD	DF-TC	DF-TD
2004	Enero	CM	TD	OK	TC	OK
	Febrero	CM	TD	OK	CM-TC	OK
	Marzo	DF-CM	TD	OK	>100-TC	OK
	Abril	OK	TD	OK	TC	OK
	Mayo	OK	TD	OK	>100-TC	OK
	Junio	OK	TD	OK	>100-TC	OK
	Julio	OK	TD	OK	TC	OK
	Agosto	OK	TD	OK	TC	OK
	Sept.	OK	TD	OK	TC	OK
	Octubre	OK	TD	OK	TC	OK
	Nov.	OK	TD	OK	TC	OK
	Dic.	DF	TD	OK	TC	OK

Tabla 2.6. Errores presentes los datos puros en la estación PTAR.

AÑO	MES	VARIABLES CLIMATICAS				
		Presión	Temperatura	Radiación Solar	H. Relativa.	Vel. Viento
2002	Enero	DF	DF	DF	DF	DF
	Febrero	DF-CM-CV	DF-CM	DF	DF	DF-CM
	Marzo	DF	DF	DF	DF	DF
	Abril	DF	DF	DF	DF	DF
	Mayo	DF	DF	DF	DF	DF
	Junio	OK	TC	DF	OK	DF
	Julio	OK	TC	DF	OK	OK
	Agosto	TC	DF-TC-NS	DF	DF	OK
	Sept.	TC	DF	DF	DF	OK
	Octubre	TC	DF	DF	DF	OK
	Nov.	DF	DF	DF	DF-CM-CV	OK
	Dic.	DF-CM	DF	DF	DF-CM-CV	DF
2003	Enero	NS	OK	OK	TC	OK
	Febrero	NS	OK	OK	TC-DF	OK
	Marzo	NS	DF	DF	TC-DF	DF
	Abril	NS	DF	DF	TC-DF	OK
	Mayo	NS	DF	DF	TC	DF
	Junio	NS	DF	DF	TC-DF	DF
	Julio	NS	DF-CM	DF	CM	OK
	Agosto	NS	DF-CM	DF	TC-DF	DF
	Sept.	NS	CM	OK	TC	OK
	Octubre	NS	CM	OK	TC	OK
	Nov.	NS	CM	OK	TC	OK
	Dic.	NS	CM	OK	TC	OK
2004	Enero	NS	TC	OK	OK	OK
	Febrero	NS	TC	OK	OK	OK
	Marzo	NS	TC	OK	OK	OK
	Abril	NS	TC	OK	OK	OK
	Mayo	NS	TC	OK	OK	OK
	Junio	NS	TC	OK	OK	OK
	Julio	NS	TC	OK	OK	OK
	Agosto	NS	TC	OK	OK	OK
	Sept.	NS	TC	OK	OK	OK
	Octubre	NS	TC	OK	OK	OK
	Nov.	NS	TC	OK	CM-CV	OK
	Dic.	NS	TC	OK	CM-CV	OK

Tabla 2.7. Errores presentes los datos puros en la estación UIS.

AÑO	MES	VARIABLES CLIMATICAS				
		Presión	Temperatura	Radiación Solar	H. Relativa.	Vel. Viento
2002	Enero	DF	DF	DF	DF	DF
	Febrero	CM-CV	CM-CV	OK	CM	CM
	Marzo	OK	OK	OK	>100-CM	OK
	Abril	OK	OK	OK	OK	OK
	Mayo	OK	DF	DF	OK	CM
	Junio	OK	OK	OK	OK	OK
	Julio	OK	OK	OK	OK	OK
	Agosto	DF	OK	OK	OK	OK
	Sept.	DF	OK	OK	OK	OK
	Octubre	OK	DF	DF	OK	OK
	Nov.	OK	OK	OK	OK	OK
	Dic.	OK	OK	OK	OK	OK
2003	Enero	OK	CM	OK	OK	OK
	Febrero	TD	CM	OK	OK	OK
	Marzo	TD	CM	OK	>100-CM	OK
	Abril	TD	TD	DF	OK	OK
	Mayo	OK	TD	OK	>100	OK
	Junio	OK	TD	OK	OK	OK
	Julio	OK	TD	OK	OK	OK
	Agosto	OK	TD	OK	>100	OK
	Sept.	OK	TD	OK	>100	OK
	Octubre	OK	TD	OK	>100	OK
	Nov.	OK	TD	OK	>100	OK
	Dic.	OK	TD	OK	>100	OK
2004	Enero	CM	OK	OK	OK	OK
	Febrero	CM	DF	DF	OK	DF
	Marzo	CM	OK	OK	OK	DF
	Abril	CM	OK	OK	DF	DF
	Mayo	DF-CM	DF	DF	DF	DF
	Junio	DF-CM	DF-TD	DF	DF	DF
	Julio	OK	TD	OK	DF	DF
	Agosto	OK	TD	OK	DF	DF
	Sept.	OK	TD	OK	DF	DF
	Octubre	OK	TD	OK	DF	DF
	Nov.	OK	TD	OK	DF	DF
	Dic.	OK	TD	OK	DF	DF

Las correcciones se le realizaron a las series que presentaban datos faltantes y cambios en la media, Los datos que presentaron tendencias y cambios en la varianza, no se le hicieron correcciones.

Las siguientes tablas muestran un resumen de los datos observados, faltantes y porcentaje de datos faltantes de las diferentes variables hidroclimaticas utilizadas en el estudio resultante del depuramiento de los datos puros.

Tabla 2.8. Información Hidroclimática estación Centro.

Año	DATOS	TEMP (°C)	PRECIP (mm)	HUMR (%)	SOLAR (W/m2)	PRESION (mmHg)	VEL VIENTO (m/s)
2001	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	161	146	161	163	161	161
	% FALTANTES	1.84	1.67	1.84	1.86	1.84	1.84
2002	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	17	0	10	9	9	14
	% FALTANTES	0.19	0.00	0.11	0.10	0.10	0.16
2003	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	175	243	185	581	155	159
	% FALTANTES	2.00	2.77	2.11	6.63	1.77	1.82
2004	OBSERVADOS	8784	8784	8784	8784	8784	8784
	FALTANTES	215	191	215	215	215	215
	% FALTANTES	2.45	2.17	2.45	2.45	2.45	2.45
2005	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	19	58	18	90	1374	18
	% FALTANTES	0.22	0.66	0.21	1.03	15.68	0.21

Tabla 2.9. Información Hidroclimática estación Chimita.

Año	DATOS	TEMP (°C)	PRECIP (mm)	HUMR (%)	SOLAR (W/m2)	PRESION (mmHg)	VEL VIENTO (m/s)
2001	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	139	121	139	385	802	1282
	% FALTANTES	1.59	1.38	1.59	4.39	9.16	14.63
2002	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	68	0	69	2	3	104
	% FALTANTES	0.78	0.00	0.79	0.02	0.03	1.19
2003	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	165	162	165	165	165	165
	% FALTANTES	1.88	1.85	1.88	1.88	1.88	1.88
2004	OBSERVADOS	8784	8784	8784	8784	8784	8784
	FALTANTES	21	16	27	24	189	25
	% FALTANTES	0.24	0.18	0.31	0.27	2.15	0.28
2005	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	89	83	92	84	83	188
	% FALTANTES	1.02	0.95	1.05	0.96	0.95	2.15

Tabla 2.10. Información Hidroclimática estación PTAR.

Año	DATOS	TEMP (°C)	PRECIP (mm)	HUMR (%)	SOLAR (W/m2)	PRESION (mmHg)	VEL VIENTO (m/s)
2001	PARA ESTE AÑO NO EXISTEN REGISTROS DE ESTA ESTACION						
2002	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	2458	1343	1612	5073	1349	1354
	% FALTANTES	28.06	15.33	18.40	57.91	15.40	15.46
2003	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	229	8760	229	229	229	229
	% FALTANTES	2.61	100	2.61	2.61	2.61	2.61
2004	OBSERVADOS	8784	8784	8784	8784	8784	8784
	FALTANTES	135	8784	6432	136	148	135
	% FALTANTES	1.54	100	73.22	1.55	1.68	1.54
2005	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	3333	2915	3672	2952	3000	3002
	% FALTANTES	38.05	33.28	41.92	33.70	34.25	34.27

Tabla 2.11. Información Hidroclimática estación UIS.

Año	DATOS	TEMP (°C)	PRECIP (mm)	HUMR (%)	SOLAR (W/m2)	PRESION (mmHg)	VEL VIENTO (m/s)
2001	PARA ESTE AÑO NO EXISTEN REGISTROS DE ESTA ESTACION						
2002	OBSERVADOS	8016	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	809	797	809	807	828	830
	% FALTANTES	10.09	9.94	10.09	10.07	10.33	10.35
2003	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	68	52	68	68	68	68
	% FALTANTES	0.78	0.59	0.78	0.78	0.78	0.78
2004	OBSERVADOS	8784	8784	8784	8784	8784	8784
	FALTANTES	467	460	480	467	485	4499
	% FALTANTES	5.32	5.24	5.46	5.32	5.52	51.22
2005	OBSERVADOS	8760	8760	8760	8760	8760	8760
	FALTANTES	1066	980	1065	1065	1066	1066
	% FALTANTES	12.17	11.19	12.16	12.16	12.17	12.17

En las estaciones PTAR y UIS existen grandes porcentajes de datos faltantes en el año 2002, debido, a que no existen datos de registro en el mes de enero y por lo tanto, se tomaron como datos faltantes.

2.4.2 Generación de Datos Faltantes.

La generación de los datos faltantes se realizó mediante correlación espacial de variables múltiples (ecuación 4.1).

$$Y_{est} = aX_1 + bX_2 + cX_3 \quad 4.1$$

En donde los coeficientes de la función se determinaron por medio de procesos de optimización usando como función objetivo una función de error.

Las funciones objetivos usadas corresponden a la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE: Root Mean Square Error) y el coeficiente de Nash – Sutcliffe (1970).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - Z_j)^2}{N}} \quad 4.3$$

Donde:

Z_i = Valor Real

Z_j = Valor Calculado

N = Numero Total de Datos

$$Nash - Sutcliffe = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - Z_j)^2}{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z}_i)^2} \quad 4.2$$

Donde:

Z_i = Valor Real.

Z_j = Valor Calculado.

\bar{Z}_i = Valor Promedio de los datos reales.

N = Numero Total de Datos.

El valor óptimo del coeficiente de Nash – Sutcliffe es 1.

Los datos faltantes de cada una de las variables climáticas fueron generados usando la función de error de Nash–Sutcliffe, por que fue la que presentó un mejor ajuste de los coeficientes de la ecuación.

Las series de tiempo de las variables hidrológicas corregidas se muestran a continuación:

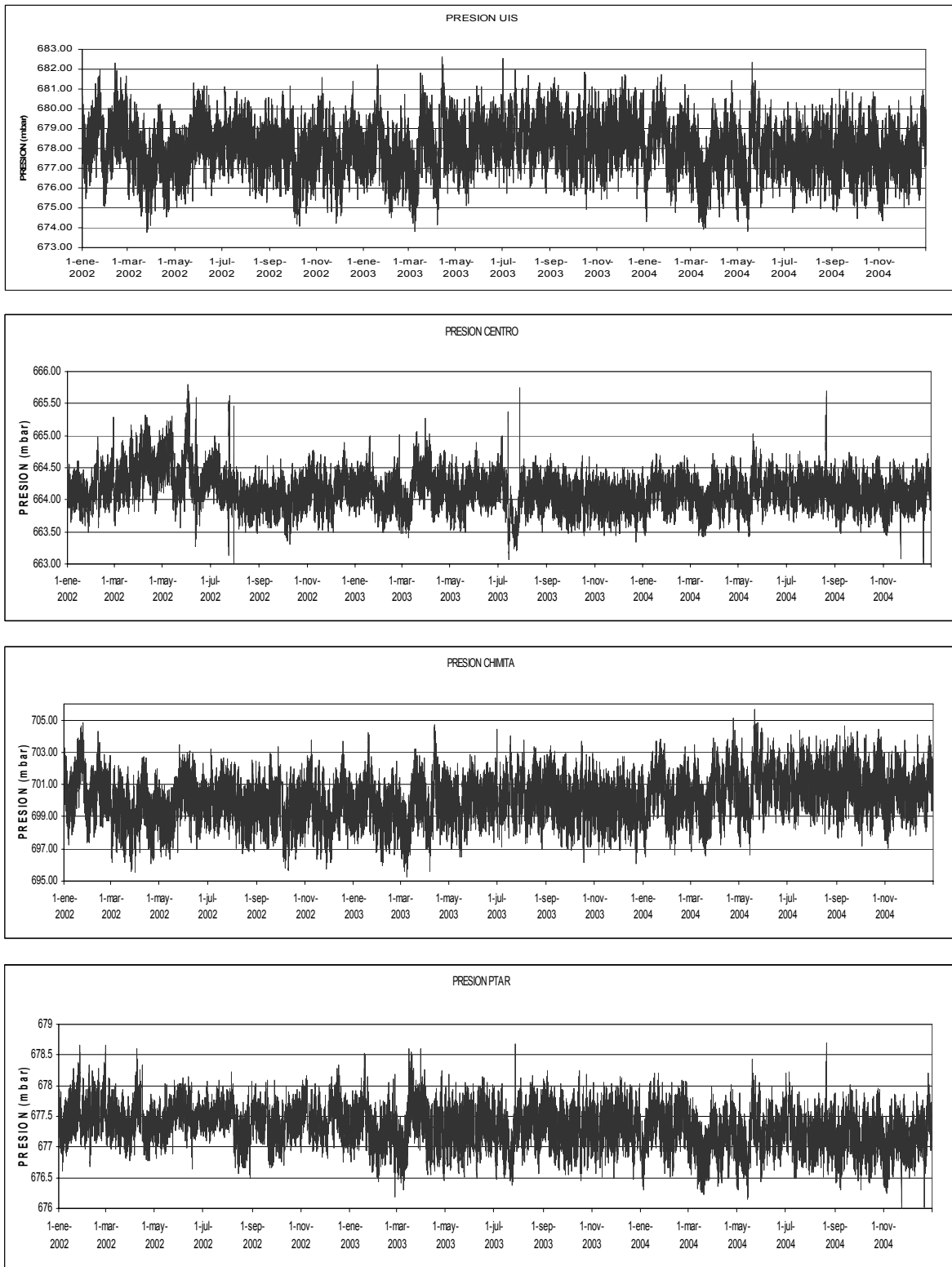


Figura 2.12. Datos de Presión generados.

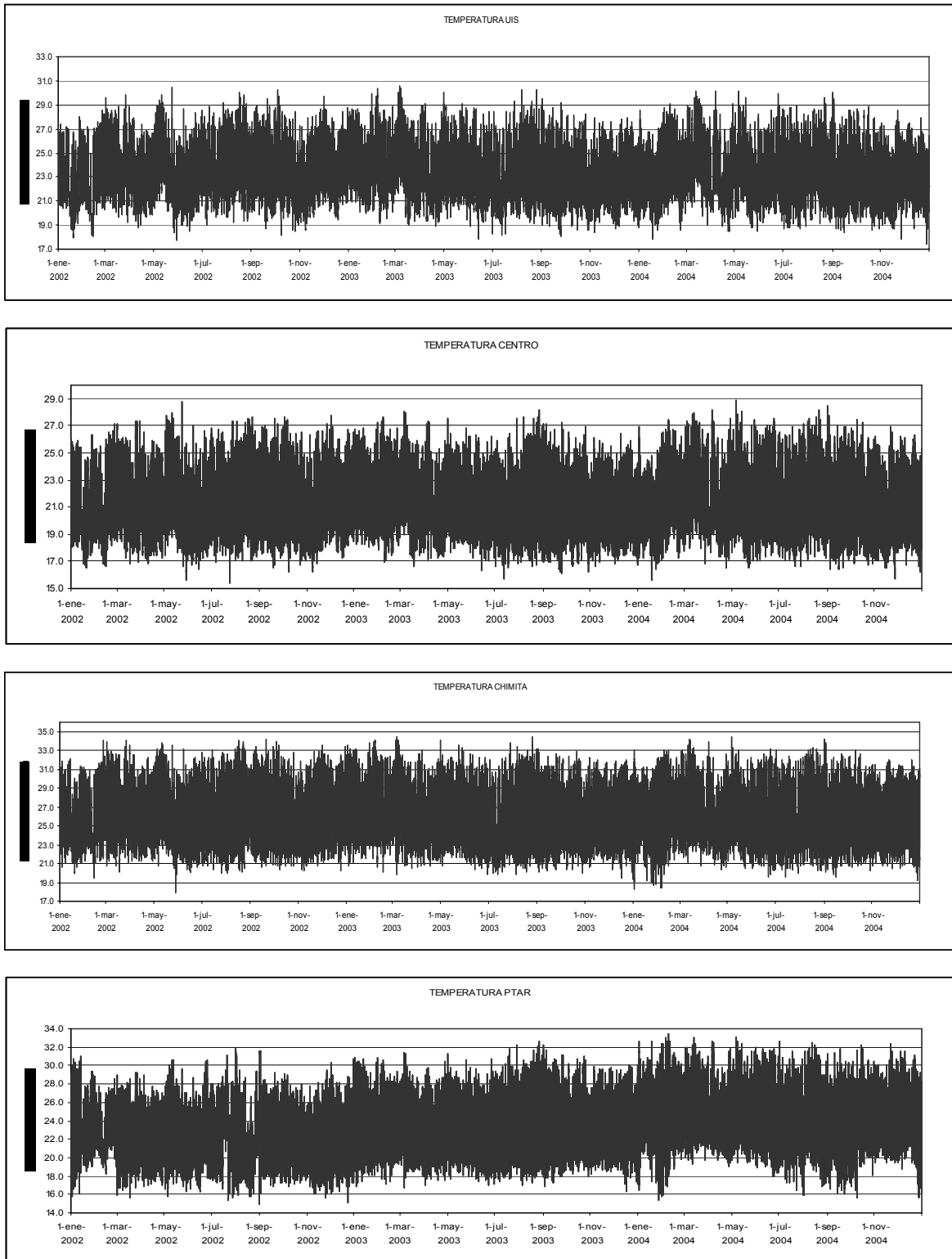


Figura 2.13. Datos de Temperatura generados.

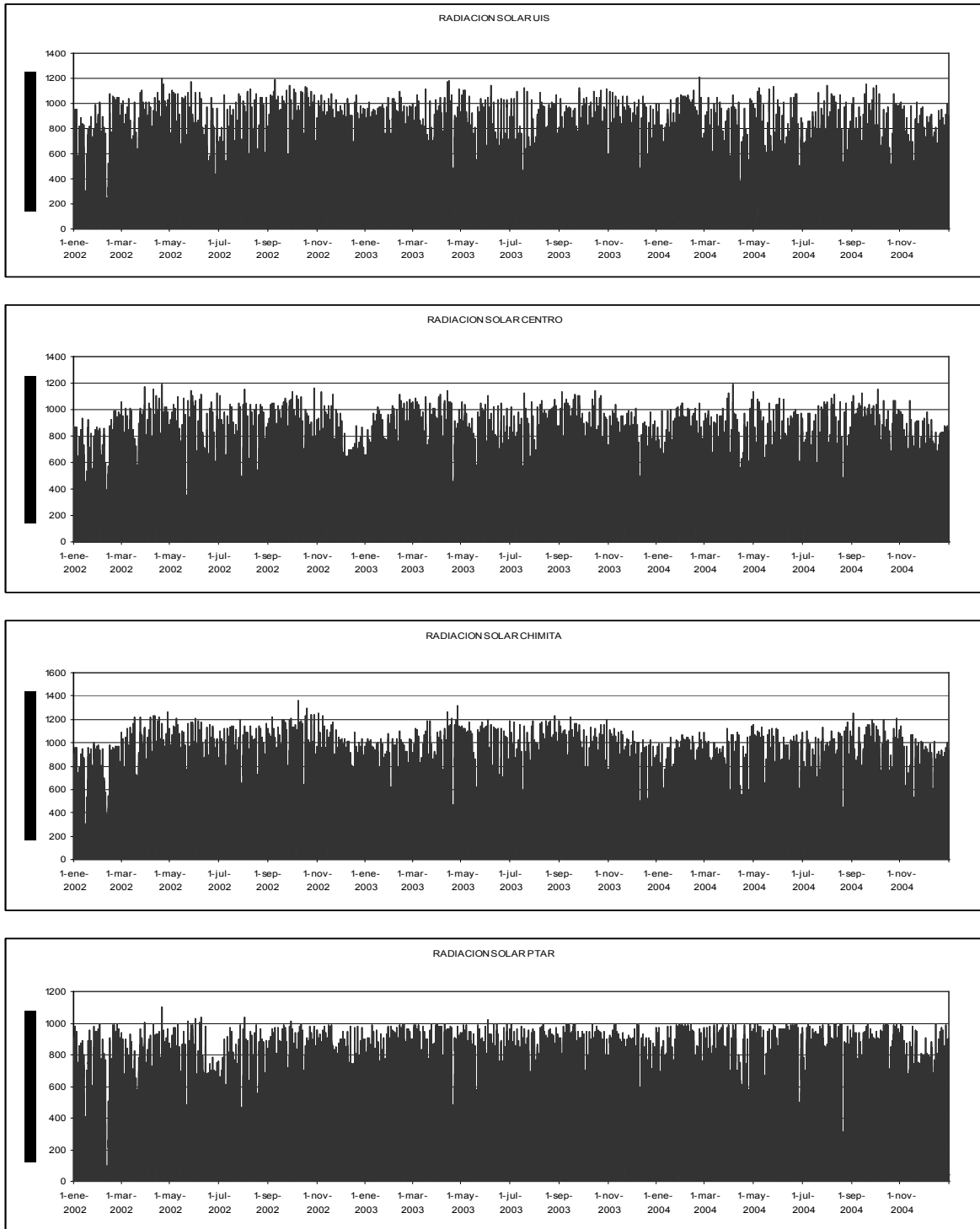


Figura 2.14. Datos de Radiación Solar generados.

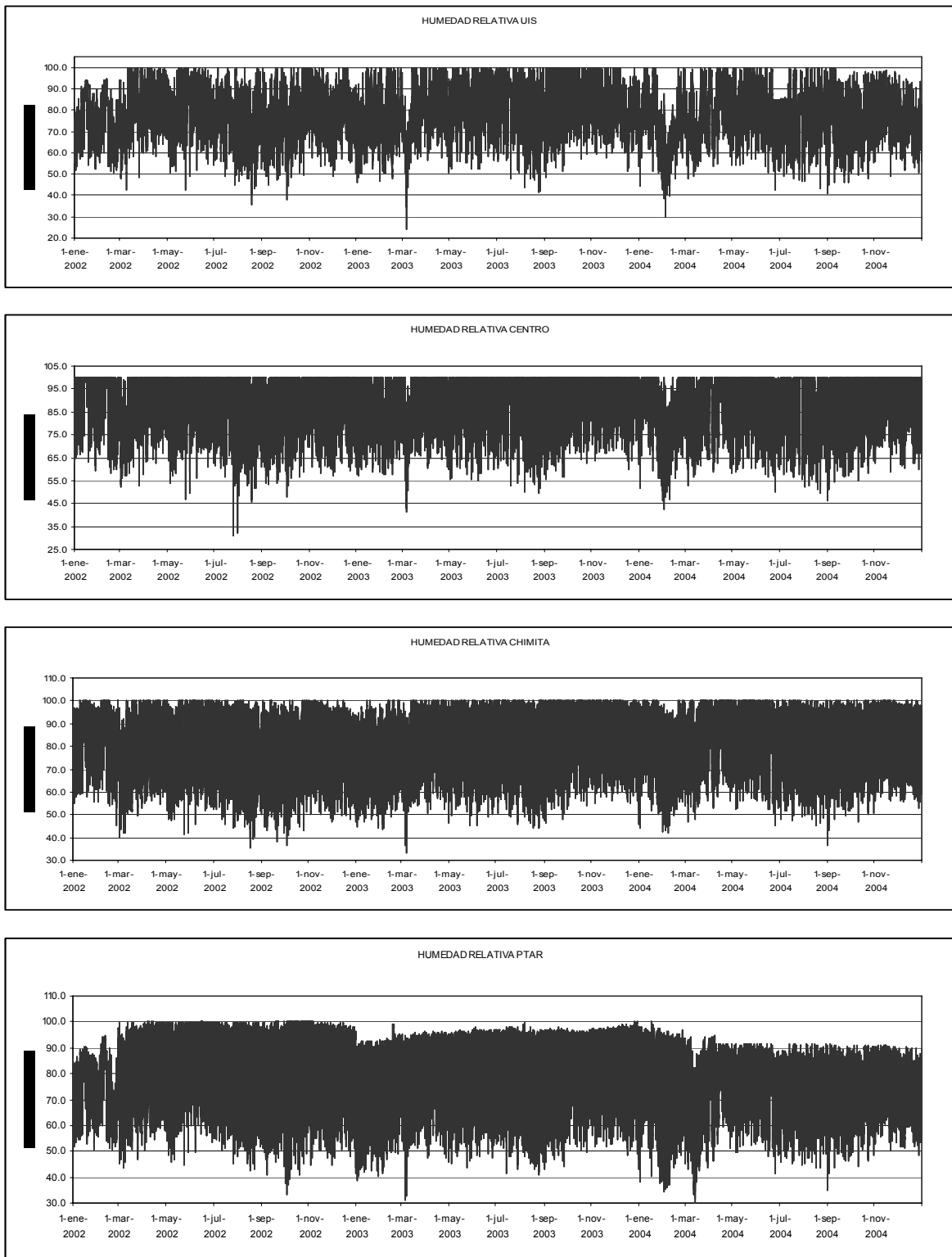


Figura 2.15. Datos de Humedad Relativa generados.

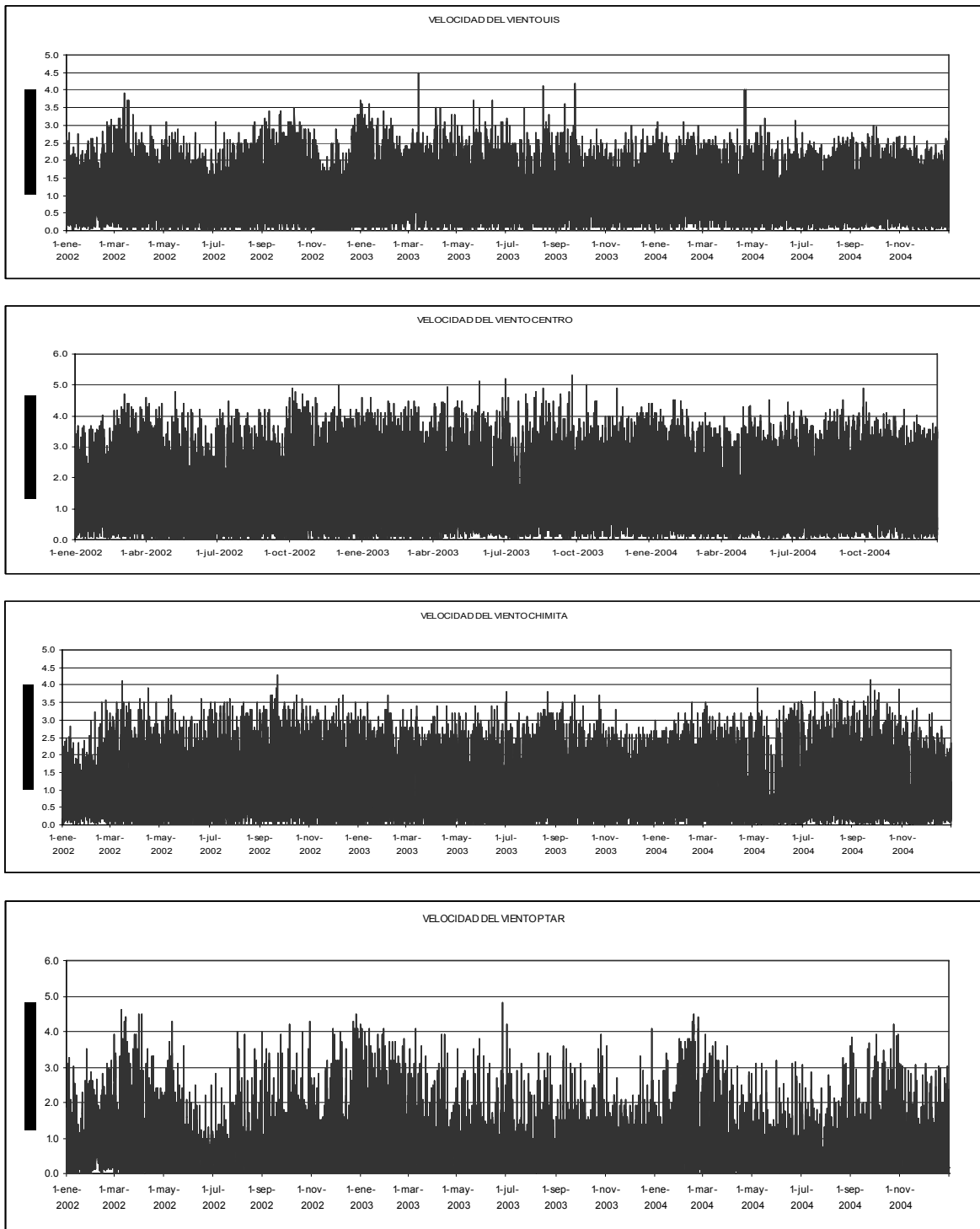


Figura 2.16. Datos de Velocidad del viento generados.

2.4.3 Evapotranspiración Potencial de Referencia.

La evapotranspiración potencial de referencia es la rata a la cual realmente el agua contenida en el suelo es evaporada desde una superficie vegetal específica.

El cálculo de la serie de tiempo de la Evapotranspiración de Referencia se realizó con base en la ecuación de Penman – Monteith con resolución horaria, siguiendo la metodología del manual 70 de la American Society of Civil Engineers (ASCE) y denominada ASCE-PM. Se tomó como superficie de referencia para el cálculo: pasto corto con altura de 12 cm.

A continuación se presenta la ecuación estandarizada para superficie de pasto corto y resolución temporal horaria.

$$ET_{os} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad 4.4$$

Donde:

- ET_{os} = Evapotranspiración de Referencia para superficie de pasto corto (mm / h)
- R_n = Radiación neta Calculada (MJ / m² h)
- G = Densidad de flujo de calor del suelo (MJ / m² h)
- T = Temperatura media horaria a 1.5 – 2.5 mts de altura (°C)
- u_2 = Velocidad media horaria del viento a 2 mts de altura (m / seg)
- e_s = Presión de vapor de saturación a 1.5 – 2.5 mts de altura (kPa)
- e_a = Presión de vapor media actual a 1.5 – 2.5 mts de altura (kPa)
- Δ = Pendiente curva Presión de vapor de saturación – Temperatura (kPa / °C)
- C_n = Constante del numerador de cambio de tipo de superficie y escala temporal (K mm seg³ / Mg h).
 $C_n = 0.37$ para resolución temporal horaria.
- C_d = Constante del denominador de cambio de tipo de superficie y escala temporal (seg / m).
 C_d , para resolución horaria toma el valor de 0.24 en horas diurnas y 0.96 en horas nocturnas.

γ = Constante psicrométrica (kPa / °C)

Las unidades del coeficiente 0.408 son: m² mm / MJ.

Las ecuaciones utilizadas para calcular los términos de la ecuación estandarizada son las siguientes:

➤ Velocidad horaria del viento a 2 mts. (μ_2)

$$\mu_2 = \mu_z \frac{4.87}{\ln(67.8 Z_w - 5.42)}$$

Donde:

μ_z : Velocidad del viento a Z_w metros sobre la superficie (m/seg)

Z_w : Altura de la medición de la velocidad del viento (m)

➤ Temperatura media del aire. (T)

$$T = \text{Temperatura promedio } (^{\circ}\text{C})$$

➤ Presión atmosférica. (P_a)

$$P_a = \frac{P_{\text{atmosferica}} \text{ (mb)}}{10} \text{ [KPa]}$$

➤ Constante Psicometrica. (γ)

$$\gamma = 0.000665 * P_a$$

➤ Pendiente curva Presión de vapor de saturación – Temperatura. (Δ)

$$\Delta = \frac{2503 \exp \left[\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right]}{(T + 237.3)^2}$$

➤ Presión de vapor de saturación. (e_s)

$$e_s = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right]$$

➤ Presión de vapor actual. (e_a)

$$e_a = \frac{HR * e_s}{100}$$

Donde:

HR: Humedad Relativa (%).

➤ Radiación neta. (R_n)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Donde:

R_{ns} : Radiación de onda corta.

R_{nl} : Radiación de onda larga.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

Donde:

α : Albedo o coeficiente de reflexión, aprox. igual a 0.23.

R_s : Radiación solar entrante. [MJ / m² h]

$$R_{nl} = \sigma * F_{cd} (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) T_{Khr}^4$$

Donde:

σ : Constante de Stefem – Boltzmann [2.042X10⁻¹⁰ MJ / K⁴ m² h]

F_{cd} : Función de nubosidad adimensional (0.05 ≤ F_{cd} ≤ 1)

T_{Khr} : Temperatura media absoluta durante el periodo horario.

[K]: (K = °C + 273.16)

$$F_{cd} = 1.35 \frac{R_s}{R_{SO}} - 0.35$$

Donde:

$\frac{R_s}{R_{SO}}$: Radiación solar relativa (0.3 ≤ $\frac{R_s}{R_{SO}}$ ≤ 1)

R_s : Radiación solar (MJ / m² h)

R_{SO} : Radiación calculada con cielo despejado (MJ / m² h)

$$R_{SO} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} * Z) R_a$$

Donde:

Z : Elevación de la estación sobre el nivel del mar.

R_a : Radiación extraterrestre (MJ / m² h)

$$R_a = \frac{12}{\pi} G_{SC} d_r [(w_2 - w_1) \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) (\text{sen}(w_2) - \text{sen}(w_1))]$$

Donde:

G_{SC} : Constante solar (4.92 MJ / m² h)

d_r : Factor de distancia relativa inversa cuadrada para tierra-sol

δ : Declinación solar (radianes)

φ : Latitud (radianes)

w_1 : Angulo de hora solar al empezar el periodo (radianes)

w_2 : Angulo de hora solar al terminar el periodo (radianes)

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left[\frac{2\pi}{365} J \right]$$

$$\delta = 0.409 \text{sen} \left[\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right]$$

Donde:

J : Es el numero del día del año entre J=1 para 1° de enero y J=365 ó J=366 para 31 de diciembre

$$w_1 = w - \frac{\pi t_1}{24}$$

$$w_2 = w + \frac{\pi t_1}{24}$$

Donde:

w : Es el ángulo de hora solar a la mitad del periodo (radianes)

t_1 : Longitud del periodo de calculo (hora)

$$w = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c) - 12]$$

Donde:

L_z : Longitud del uso horario (grados)

L_m : Longitud de la radiación solar en el sitio de medida (grados)

S_c : Corrección estacional para hora solar (hora)

φ : Latitud (radianes)

$$S_c = 0.1645 \operatorname{sen}(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \operatorname{sen}(b)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364}$$

$$w_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$$

$$\beta = \arcsen[\operatorname{sen}(\varphi)\operatorname{sen}(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(w)]$$

Donde:

β : Angulo de sol sobre la horizontal a la mitad del periodo (radianes)

➤ Densidad de flujo de calor del suelo (G).

$$G_{\text{día}} = 0.1R_n$$

$$G_{\text{nocturno}} = 0.5R_n$$

2.4.4 Evapotranspiración Potencial.

En esta sección se mostrara la forma de calcular la evapotranspiración potencial partiendo de la evapotranspiración de referencia, siguiendo la metodología de la ASCE y la FAO para el cálculo del factor de cultivo K_c .

$$ET_{\text{pot}} = K_c * ET_{OS} \quad 4.5$$

Donde:

ET_{pot} = Evapotranspiración Potencial.

ET_{OS} = Evapotranspiración Potencial de Referencia para pasto corto.

K_C = Factor de Cultivo.

El factor de cultivo K_C , se refiere a un coeficiente que relaciona los valores de la evapotranspiración de referencia obtenidas del pasto con el uso real de la cobertura vegetal de la cuenca. El factor de cultivo se calcula dependiendo del tipo de cultivo, su variedad y la etapa de desarrollo en que se encuentra el cultivo.

Al utilizar el pasto corto como referencia para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, se asume que la cobertura vegetal de la totalidad de la cuenca es pasto. Esto no es cierto, por lo tanto es necesario realizar una representación más real de la cobertura vegetal, para esto es necesario conocer los usos del suelo de la cuenca.

Los usos del suelo de la cuenca del Río de Oro utilizados en el presente estudio se tomaron de la CDMB y basándose en el estudio realizado por Izasa (2004).

A continuación se muestra la tabla 2.12 que realiza una descripción de los usos del suelo de la cuenca del Río de Oro y su respectivo factor de cultivo K_C . Cabe anotar que el cálculo de los factores de cultivos no fueron fáciles de establecer, debido a que no existen estudios que determinen estos factores para nuestra zona de estudio la cual pertenece a un clima tropical. Los factores manejados por la FAO y la ASCE parten de estudios empíricos realizados en Europa y Estados Unidos con situaciones climáticas diferentes a las nuestras.

Tabla 2.12. Clasificación de los Usos del Suelo en la Cuenca del Río de Oro.

TIPO DE CULTIVO	AREA (HAS)	K _c	SUBZONAS	MACROZONAS
Distrito de Manejo Integrado	5073.3	1	PASTOS	HERBACEA
Pastos Naturales	4454.6	1		
Cultivos Cítricos	111	0.8	CULTIVOS	
Cultivos Semipermanente	3648.2	0.81		
Cultivos Mixtos	6517.8	0.95		
Cultivos de Piña	309.7	0.5		
Cultivos – Pastos – Rastrojos	1872.9	1.02		
Café Sombra	45.4	1.1		
Caña – Caracolí	233.8	1.03		
Matorrales	4629.7	1	VEGETACION ESPECIAL	
Pajonales	2137.9	0.9		
Vegetación de Páramo	318.7	1		
PROMEDIO		0.92		
Bosque Secundario	16061.2	0.8	BOSQUE SECUNDARIO	BOSCOSA
Coníferas	375.3	0.85	BOSQUE PLANTADO	
Rastrojo	4292.7	0.9	RASTROJO	
PROMEDIO		0.85		
Erosión	42.2	1.05	ZONA SIN VEGETACION	SIN VEGETACION
Material de Arrastre	21.2	1.05		
Zona Urbana	6691.9	1.05		
Zona Suburbana	104.7	1.05		
PROMEDIO		1.05		
El área total de la cuenca es de 585 Km ² (58500 Has).				

Fuente: (Izasa, 2004) y modificado por el autor (2006).

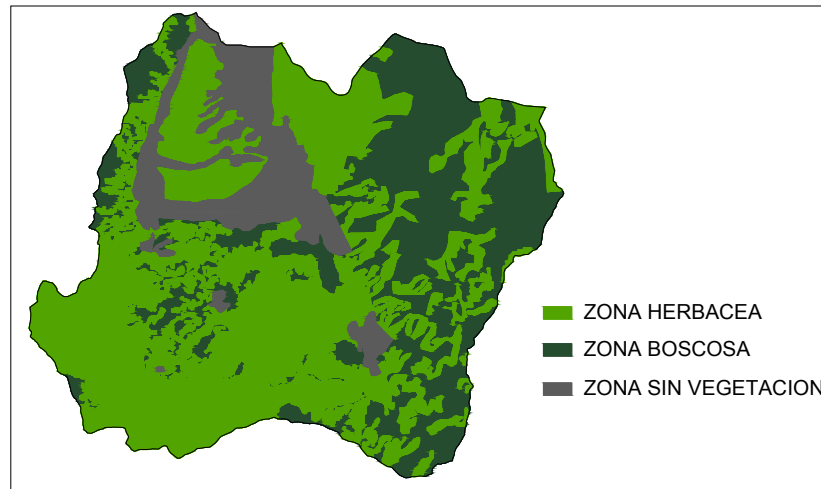


Figura 2.17. Esquema de los Usos del Suelo de la Cuenca del Río de Oro.

Con los valores de la ET_{os} diarios distribuidos espacialmente y los coeficientes de cultivo en cada zona particular se procede a la estimación de la ET_{pot} utilizando la ecuación 4.5, siguiendo una metodología parecida al cálculo de la espacialización de la precipitación, utilizando una máscara de usos del suelo de la cuenca con sus respectivos valores del factor de cultivo K_c .

La espacialización de la evapotranspiración potencial se realizó para obtener las series de tiempo de la cuenca y subcuencas para efecto de utilización en el modelo. En la figura 2.17, se muestra la distribución temporal de la espacialización de la Evapotranspiración potencial estimada para la cuenca y las subcuencas del río de oro.

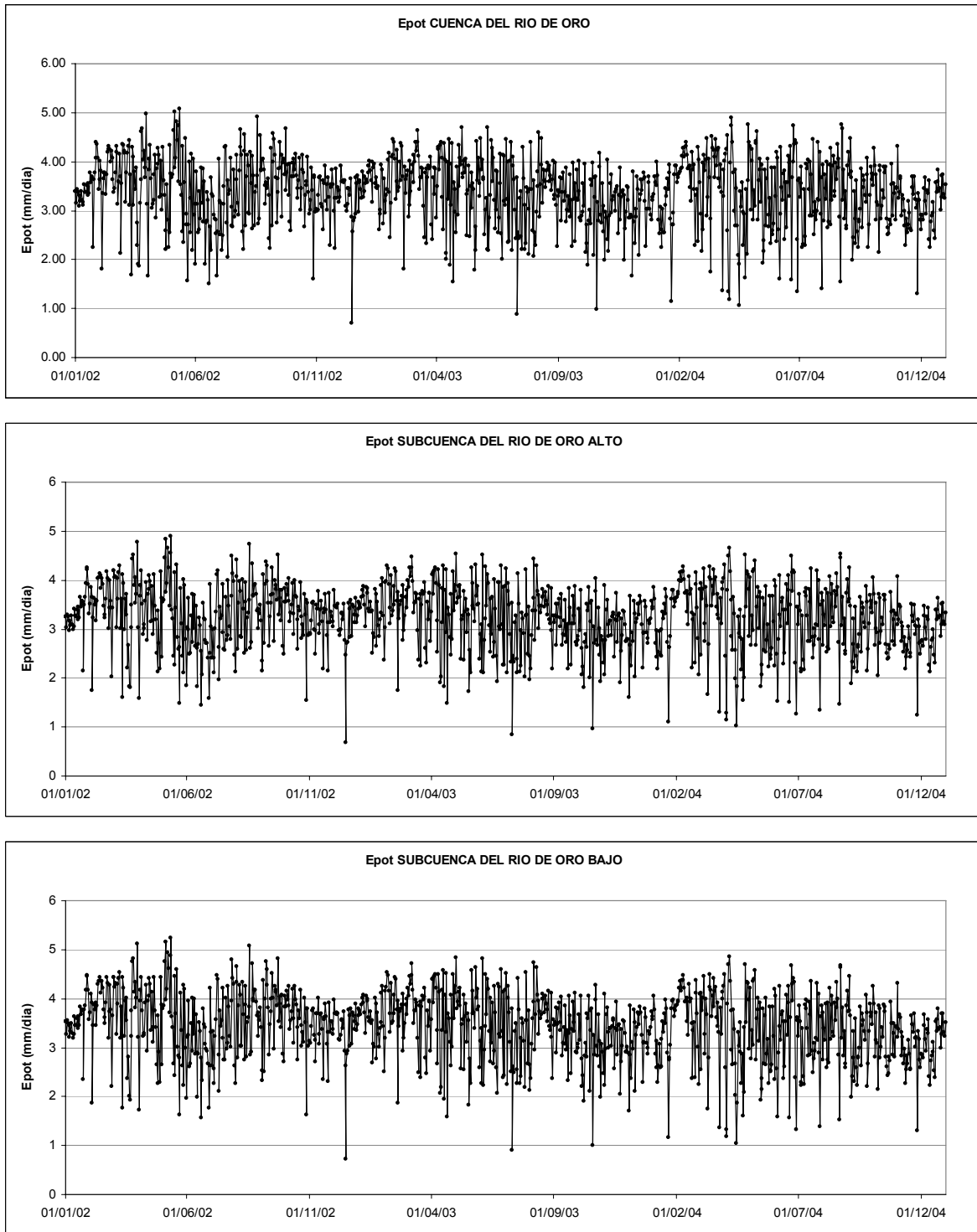


Figura 2.18. Series de Tiempo de Evapotranspiración Diaria por Cuenca y Subcuencas.

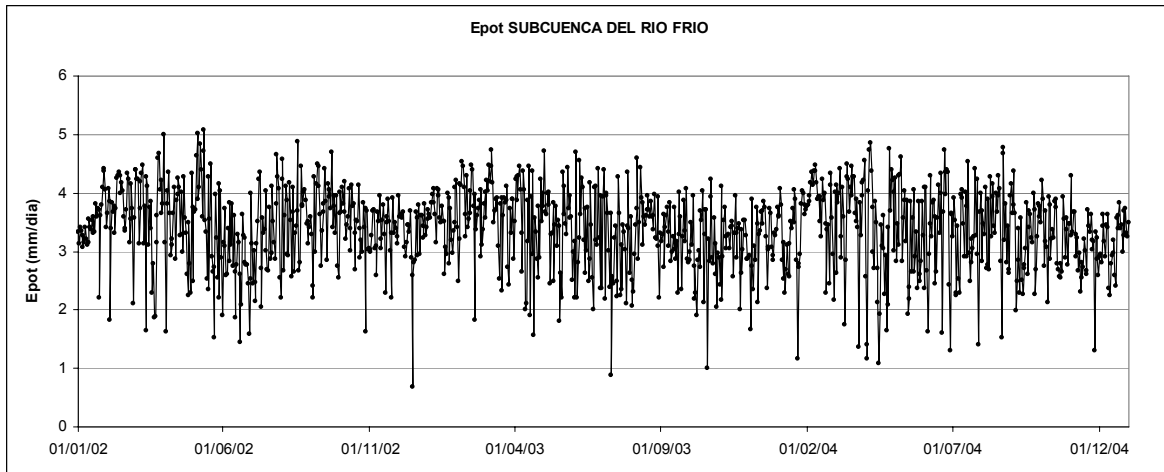


Figura 2.18. Series de Tiempo de Evapotranspiración Diaria por Cuenca y Subcuencas. Continuación.

2.4.5 Evapotranspiración Real.

La evapotranspiración real esta dada por el valor real de agua que esta pasando a la atmósfera en forma de vapor proveniente de las plantas y el suelo superficial.

Para la estimación de la evapotranspiración real se debe realizar un ajuste de la ET_{pot} con un coeficiente de humedad del suelo (K_s), el cual representa porcentajes de humedad para cada mes de acuerdo al comportamiento bimodal de la precipitación.

La evapotranspiración real esta dada por la ecuación:

$$ET_{real} = ET_{OS} * K_C * K_S \quad 4.6$$

$$ET_{real} = ET_{POT} * K_S \quad 4.7$$

Donde:

ET_{real} = Evapotranspiración Real.

ET_{pot} = Evapotranspiración Potencial.

ET_{OS} = Evapotranspiración Potencial de Referencia para pasto corto.

K_C = Factor de Cultivo.

K_S = Coeficiente de Humedad del Suelo.

Para el calculo de los factores de humedad del suelo nos basaremos en el estudio realizado por García y Otero (2005), los cuales determinaron los porcentajes de humedad del suelo por medio de porcentajes de acuerdo al periodo en que se encuentre cada mes, teniendo en cuenta la precipitación presente en los meses anteriores.

Los coeficientes dados por García y Otero, para la cuenca del Río de Oro están dados en la siguiente tabla.

Tabla 2.13. Factores de Humedad del Suelo para la Cuenca del Río de Oro.

Periodo Seco 1			Periodo Lluvioso 1			Periodo Seco 2			Periodo Lluvioso 2		
DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
0.6	0.6	0.6	0.8	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	0.85	0.9	0.9

Fuente: (García, Otero, 2005).

En la figura 2.14, se observa la serie de tiempo de la evapotranspiración real con resolución temporal diaria estimada para la cuenca del Río de Oro en el periodo de estudio.

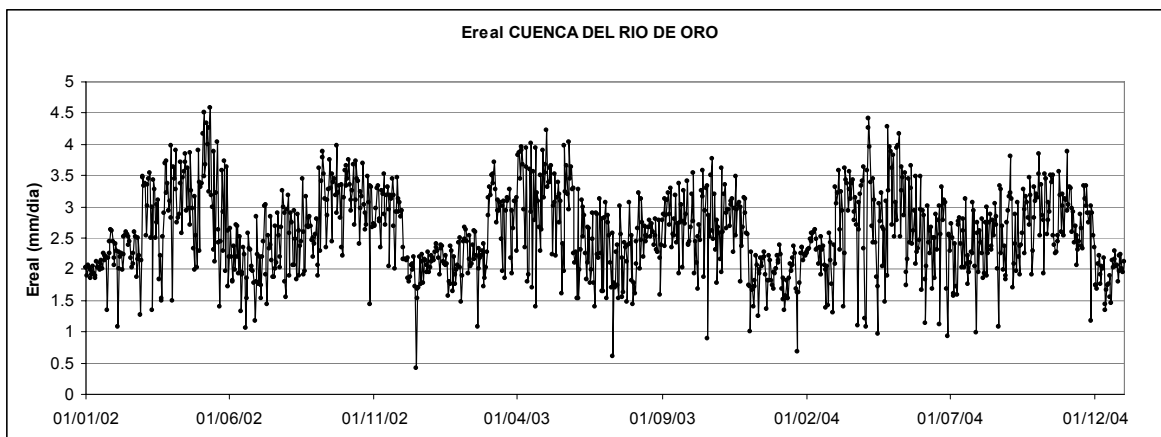


Figura 2.19. Series de Tiempo de la Evapotranspiración Real.

2.5 DATOS DE CAUDALES

Como se indico anteriormente las series de tiempo de caudales utilizadas en el estudio pertenecen a las estaciones de Café Madrid y Majadas con resolución temporal diaria pertenecientes al periodo comprendido entre los años 2002 a 2004.

Para este estudio no se realizaron correcciones de consistencia y homogeneidad en la serie de datos, debido a la falta de información.

El análisis de los datos de caudales para nuestro estudio consistió en determinar la presencia de datos faltantes en la serie a efectos de corrección y llenado de estos, además se presentó un salto en la media de los datos del año 2002 en la estación Majadas la cual fue corregida utilizando los años 2003 y 2004.

La grafica mostrada a continuación muestra las series de tiempo de caudales medidos de las estaciones Café Madrid y Majadas en el periodo de estudio.

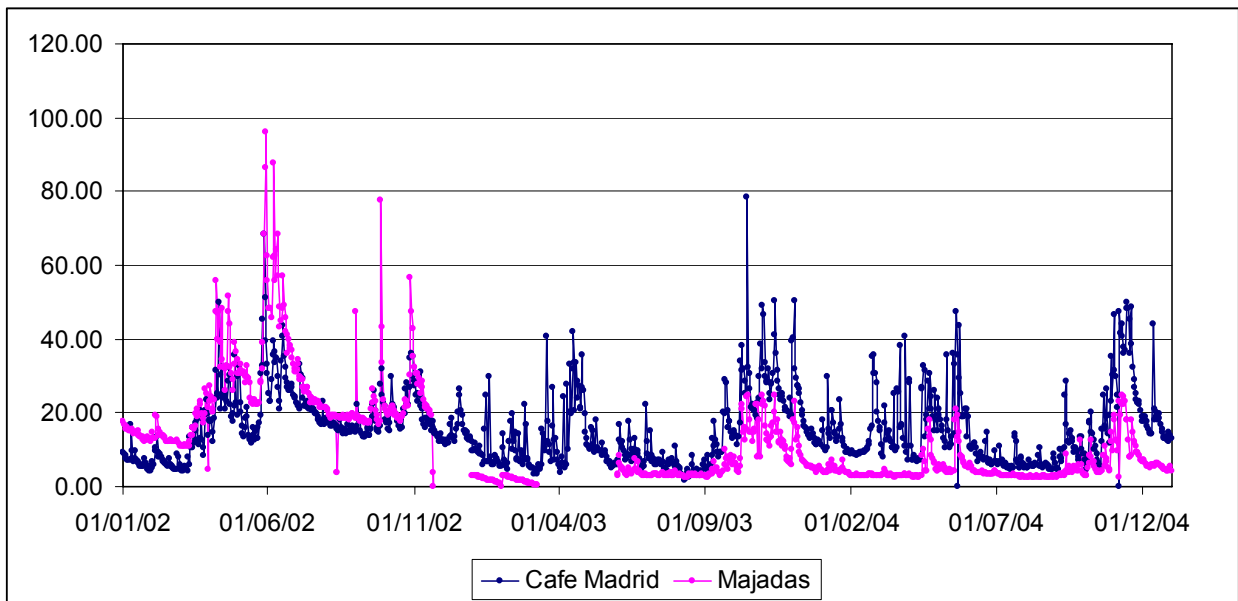


Figura 2.20. Series de Tiempo de datos puros de las estaciones Café Madrid y Majadas.

Como podemos apreciar en la grafica anterior los datos de la estación majadas presentan un brinco irregular en la media en el año 2002, sobrepasando los valores de caudales de la estación Café Madrid lo cual es algo ilógico, además los datos comprendidos entre el periodo del 7 de abril al 5 de julio del 2002 presentan un cambio irregular en la varianza. Los vacíos en la serie representan los datos faltantes.

Estas irregularidades en los datos se rectificaron haciendo un ajuste en la media utilizando la serie de tiempo del año 2003 y 2004.

Los datos con cambios en la varianza, además de ciertos datos puntuales con cambios bruscos en la continuidad de los datos (datos muy elevados o muy bajos con respecto del anterior) producto de errores sistemáticos, se trataron como datos faltantes. En seguida se muestra el resultado del ajuste realizado.

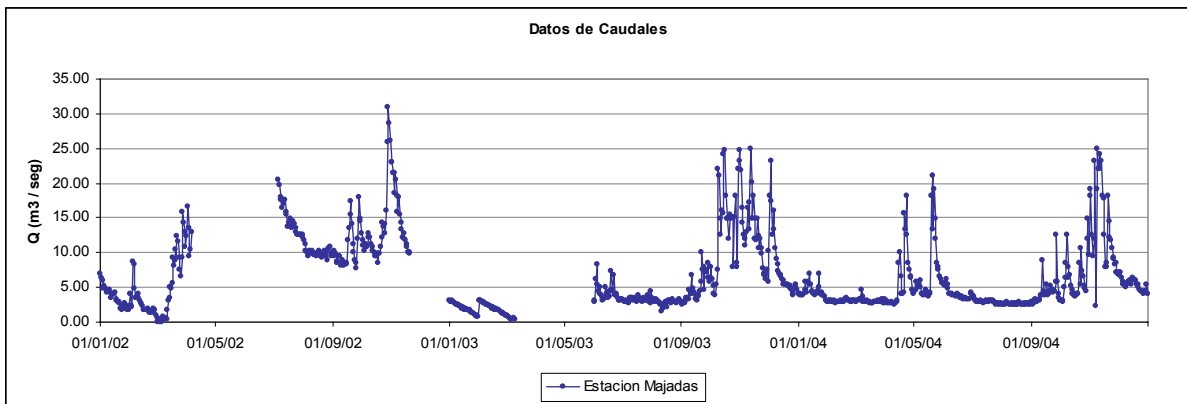


Figura 2.21. Serie de Tiempo de Caudales de la Estación Majadas con datos faltantes entre los años 2002 – 2004.

Los sectores vacíos en la grafica indican los lugares donde se encuentran los datos faltantes.

La siguiente tabla muestra la descripción de los datos de caudales faltantes para las estaciones utilizadas en el estudio luego del ajuste realizado.

Tabla 2.14. Información de datos faltantes en las estaciones Café Madrid y Majadas.

Año	DATOS	CAFÉ MADRID	MAJADAS
2002	OBSERVADOS	365	365
	FALTANTES	0	130
	% FALTANTES	0.0	35.61
2003	OBSERVADOS	365	365
	FALTANTES	0	82
	% FALTANTES	0.0	22.46
2004	OBSERVADOS	366	366
	FALTANTES	2	0
	% FALTANTES	0.55	0.0

Como se puede apreciar en la anterior tabla la estación Café Madrid presenta un buen registro de datos con tan solo dos datos faltantes en el periodo de estudio. Caso contrario ocurre con la estación Majadas que presenta 212 datos faltantes, lo que equivale a un 19.34% de los datos.

El proceso de llenado de datos faltantes para las series de tiempo se llevó a cabo utilizando el modelo autorregresivo para llenado de datos utilizando variables exogenas ARMAX (1,1,1) (Blanco, Gualdron, 2006).

Seguidamente se muestran las series de tiempo de las estaciones, resultado del llenado de datos faltantes utilizando ARMAX (1,1,1).

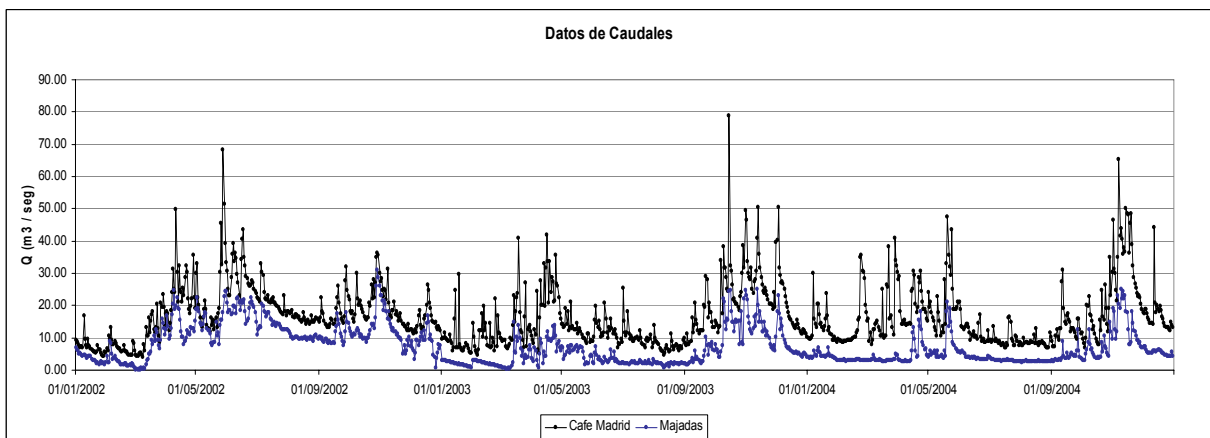


Figura 2.22. Series de Tiempo de Caudales generados de las Estaciones Café Madrid y Majadas entre los años 2002 – 2004.

La estación Café Madrid se encuentra al cierre de la cuenca superior del río Lebrija después de la unión del Río de Oro con el río Suratá, por su parte la estación Majadas se encuentra al cierre de la subcuenca del río tona¹ después de la unión de los Ríos Suratá y Tona para formar el río Suratá. Por este motivo la diferencia entre los aforos de la estación Café Madrid con los de Majadas, nos darán una aproximación de los datos de caudal aportados por el Río de Oro.

De esta manera estos valores se convierten en nuestra serie de datos de caudal para la cuenca del Río de Oro.

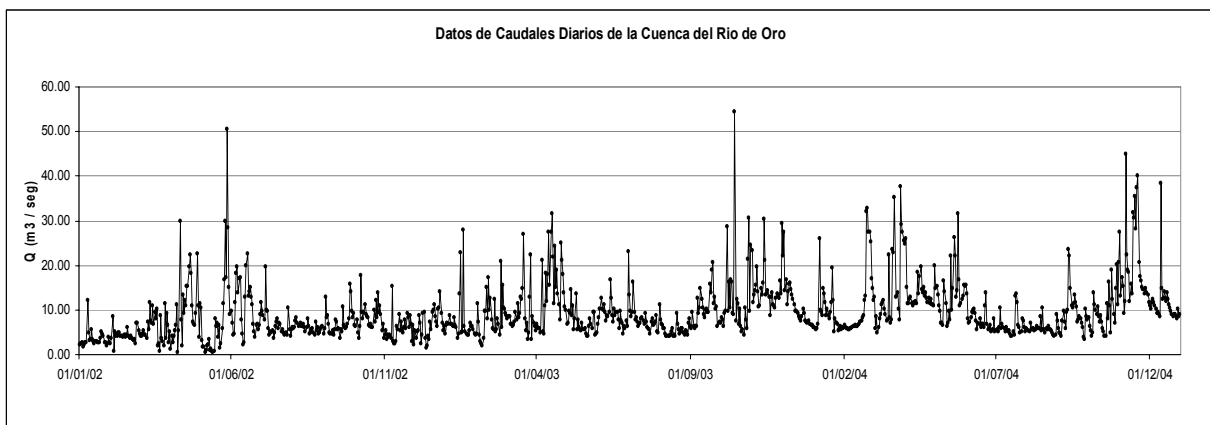


Figura 2.23. Serie de tiempo de caudales diarios estimada para la cuenca del Río de Oro.

A la serie de tiempo de caudales obtenidos para nuestra cuenca de estudio no se le hicieron análisis de consistencia y homogeneidad, debido a que la serie de tiempo es muy corta, pero se tomará esta para la aplicación del modelo.

Como resumen de este capítulo podemos mencionara que los datos utilizados para el presente estudio no son los mejores debido a la cantidad de errores sistemáticos presentes en la medición de los registros.

¹ La subcuenca del río tona es análoga a la cuenca del río de oro y pertenecen al sistema de subcuencas de la cuenca superior del río Lebrija (CSRL)

La precipitación media diaria multianual para el periodo de estudio fue de 1095.23 (mm/año), casi 380 mm/año por debajo de la media obtenida de isoyetas por la CDMB (1991). Por otra parte para la evapotranspiración potencial se obtuvo una media de 1233.88 (mm/año). Claramente podemos observar que la ETpot supera la precipitación casi en 200 mm/año, esto debido posiblemente a la existencia de datos faltantes en las series de tiempo de precipitación.

3 MODELO CONCEPTUAL PRECIPITACION – ESCORRENTIA NAM.

La respuesta hidrológica de una cuenca es la integración de los procesos hidrológicos que ocurren tanto en superficie como en subsuperficie y que deben ser estudiados y explicados en forma integral. La interrelación compleja entre las componentes: atmosférica, superficial y subsuperficial (zona no saturada y saturada) requieren que se haga uso de diferentes disciplinas del conocimiento para poder entender el movimiento del agua en la cuenca. (Guzman et al, 2003).

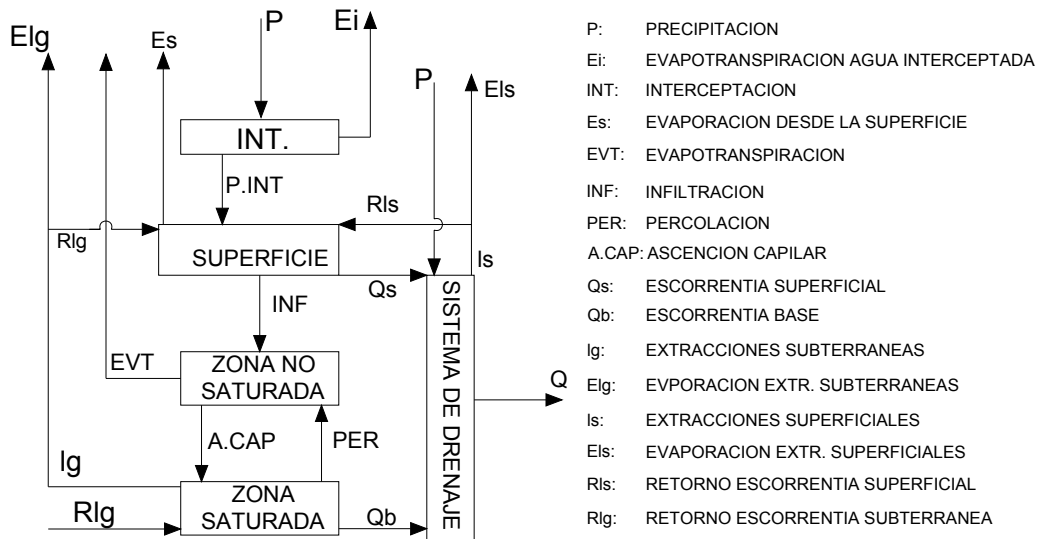


Figura 3.1. Interacción de los procesos hidrológicos.

Fuente: CERS (Guzmán et al, 2005).

El ciclo hidrológico puede entenderse como un sistema dentro del cual interactúan variables como la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía y otras fases que hacen parte del ciclo hidrológico. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre si y que forman un todo.

Análogamente un sistema hidrológico se puede definir como una estructura o volumen en el espacio, rodeado por una frontera que acepta agua y otras entradas; opera internamente y las produce como salidas (Monsalve, 1999).

El objetivo primordial al momento de realizar el estudio analítico de un sistema hidrológico como el de una cuenca es el conocer la forma como están funcionando las variables del sistema para poder predecir sus caudales de salida. Lo anterior se puede realizar mediante la modelación del sistema.

Un modelo es la representación teórica mediante formulas matemáticas que simulan el comportamiento de un sistema real. Por ende un modelo hidrológico conceptual precipitación-escorrentía, simula el comportamiento de la escorrentía superficial de una cuenca ante un evento de lluvia.

Los modelos hidrológicos se dividen en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos o conceptuales (numéricos o matemáticos), el primero es un modelo a escala que representa el sistema real en una escala reducida por medio de planteamientos físicos, y los abstractos que representan el sistema en forma matemática (ecuaciones que relacionan variables de entradas y salidas) por medio de similitudes de carácter hidrológico y flujo de canales.

Los modelos físicos requieren de una información muy completa y muy detallada de la hidrografía, la geología, la topografía, etc. de la zona de estudio correspondiente. Por ende, esta información no es fácil de conseguir en nuestro medio ya que nuestras zonas de estudio no presentan una adecuada instrumentación que nos pueda llevar a tener datos suficientes para una modelación física correcta.

Por otra parte los modelos conceptuales pueden llegar a ser menos difíciles de utilizar debido a que las variables utilizadas para la simulación pueden ser indirectas, cualitativas o cuantitativas con una precisión relativamente baja. Este tipo de modelos se utilizan en estudios de carácter global o estudios en los que se pueda trabajar con una baja precisión en los datos y en los resultados.

El modelo numérico es un algoritmo matemático que intenta describir fenómenos que suceden en la naturaleza. Se trata de una herramienta que nos ayuda al estudio de parámetros de interés científico. El algoritmo matemático de un modelo es traducido a un lenguaje de programación para ser utilizado mediante un software.

Los modelo numérico nos permiten a posteriori, comparando sus resultados con resultados experimentales u observaciones, verificar la adaptación de dicho algoritmo y proporcionar valores de variables no medidas experimentalmente (Sánchez, 2004).

A su vez, los modelos físicos y los conceptuales se pueden dividir en modelos de tipo distribuido, semidistribuido y agregados.

Los modelos distribuidos permiten representar el cambio de las variables hidrológicas en el espacio, al igual que las características del suelo y subsuelo, para una representación mas precisa de la composición física de la cuenca de estudio.

Los modelos semidistribuidos al igual que los distribuidos permiten la representación espacial de las diferentes características físicas de la cuenca, pero permite utilizar algunas variables como homogéneas en toda la extensión de la zona de estudio. Este tipo de modelos es muy utilizado en nuestro medio debido a que existen pocos estudios de las zonas y podemos realizar aproximaciones de las variables menos monitoreadas y poder homogenizarla en toda la zona.

Por último los modelos agregados toman las variables hidrogeológicas como homogéneas en toda la zona de estudio y se desprecia la variabilidad espacial de las componentes hidrológicas y del suelo. En el presente estudio se utilizara el modelo hidrológico conceptual, agregado NAM.

El modelo conceptual hidrológico debe brindar información sobre los diferentes procesos que transforman y regulan la respuesta hídrica así como su origen y movimiento en un espacio de control determinado. Estos “procesos de

transformación”, están condicionados o dependen de factores climáticos, meteorológicos, geomorfológico, litológico, estructurales, químicos, vegetación, suelos, red de drenajes, etc., lo anterior obliga un trabajo interdisciplinario que permita el conocimiento de dichos temas en el planteamiento del modelo conceptual. (Guzman et al, 2003).

3.1 MODELO NAM.

La descripción del modelo NAM dada a continuación fue extractada del Simplified Spreadsheet version Instruction Manual (DHI, 1999) y del estudio Cuenca Experimental del Río Sucio (Guzman et al, 2005).

El modelo NAM ha sido desarrollado en el Instituto Hidráulico Danés (DHI) y es parte de MIKE 11, un paquete de software para la simulación de crecientes, transporte de sedimentos, calidad de las agua en la desembocadura de los ríos, sistemas de irrigación y cuerpos de aguas similares.

La presente extensión del modelo aplicada en el proyecto es una versión simplificada del modelo NAM. Algunos componentes tales como nivel freático, almacenamiento y ascenso capilar no han sido incluidos en el modelo simplificado.

NAM es una abreviación de “Nedbor Afstromings Model” que significa modelo de precipitación – escorrentía (DHI, 1999). Este modelo fue desarrollado por la sección de hidrología del Instituto de Hidrodinámica e Ingeniería Hidráulica de la Universidad Técnica de Dinamarca. El modelo hidrológico NAM modela los procesos de precipitación y escorrentía a escala de cuenca, en el cual mediante un conjunto de funciones matemáticas se describe en una forma cuantitativa el comportamiento de la fase terrestre del ciclo hidrológico. El modelo NAM en su

forma original puede considerarse como determinístico, agregado, conceptual con una entrada moderada de datos. NAM simula los procesos de precipitación – escorrentía considerando el contenido de agua en cuatro almacenamientos diferentes y mutuamente interrelacionados que representan las distintas componentes físicas de la cuenca. Estos almacenamientos son:

- Almacenamiento de nieve.
- Almacenamiento superficial.
- Zona de raíces o almacenamiento inferior.
- Almacenamiento subterráneo.

Los datos básicos de entrada requeridos para el modelo NAM son:

- Parámetros del modelo.
- Condiciones iniciales.
- Datos meteorológicos.
- Caudales para la calibración y validación del modelo.

Los datos meteorológicos básicos son:

- Precipitación.
- Evapotranspiración potencial.
- Temperatura, en caso de que se vaya a tener en cuenta la componente de nieve.

La versión simplificada del modelo, produce como resultados principales la escorrentía de la cuenca que incluye flujo superficial, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea o flujo base, desde la parte superior del acuífero hasta la parte mas baja de este.

3.2 ESTRUCTURA DEL MODELO.

El modelo NAM al ser considerado originalmente como un modelo agregado trata la cuenca como una unidad, es decir, que los parámetros y las variables empleadas en su funcionamiento representan valores promedios para la totalidad de la cuenca.

NAM esta basado en ecuaciones físicas y ecuaciones semi-empíricas. De esta forma algunos parámetros del modelo pueden ser inicialmente evaluados de las condiciones físicas de la cuenca, pero estos deben ser mejorados por procesos de calibración, teniendo en cuenta las salidas del modelo. El esquema del modelo mostrado en la figura 3.2, representa la fase terrestre del ciclo hidrológico, en donde el agua es repartida en cuatro almacenamientos.

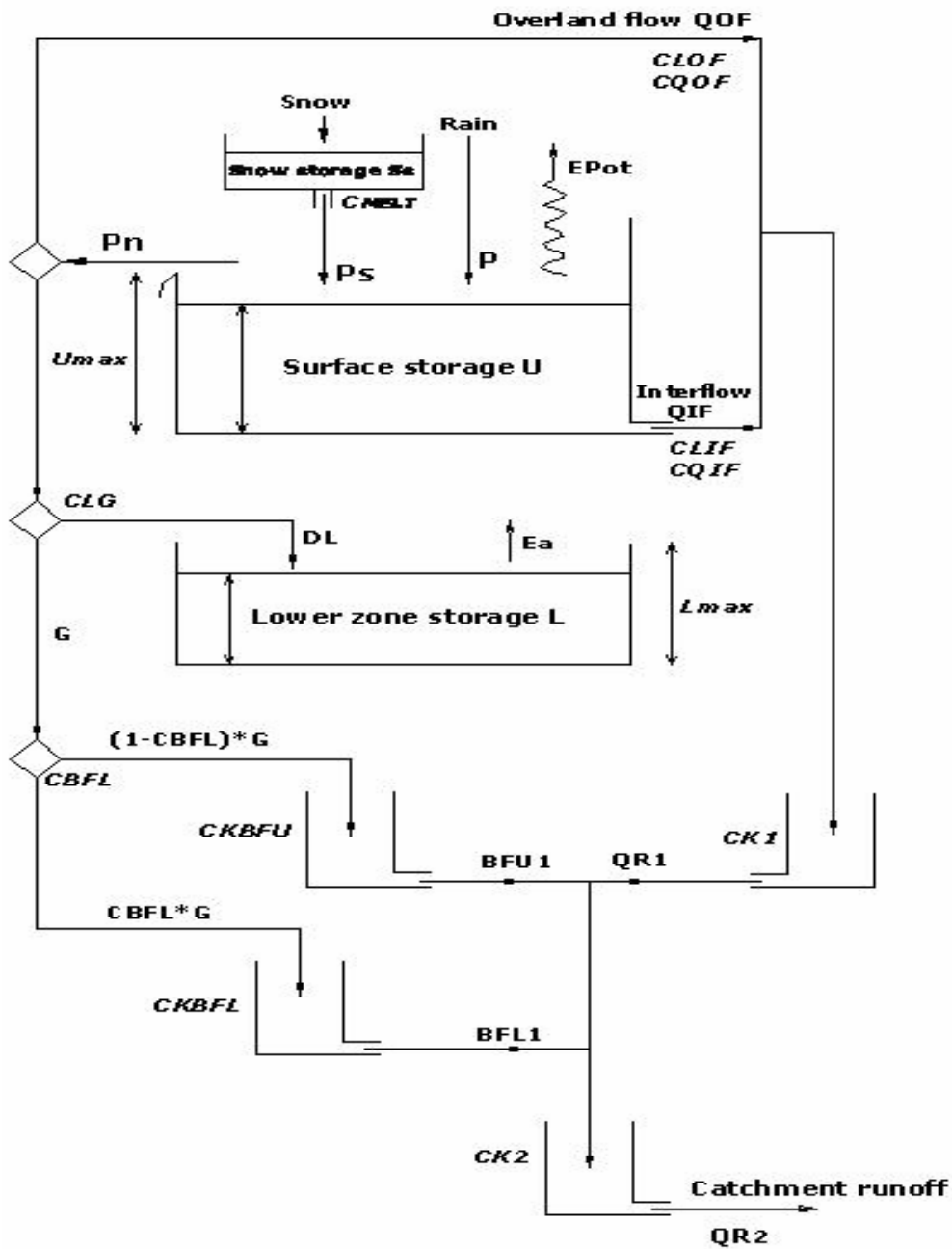


Figura 3.2 Estructura del modelo NAM.

Las diferentes variables y los parámetros que hacen parte del modelo NAM son:

Precipitación P: puede ser un valor diario, horario, etc. Dado en mm. (Para el presente proyecto se tomó la precipitación con resolución diaria en mm/día.)

Evapotranspiración potencial **Epot**: Al igual que la precipitación los valores pueden estar dados en resolución diaria, horaria, etc. Dado en mm. (Tomada con resolución diaria en mm/día.)

Temperatura **Temp**: Esta solo es necesaria si se presentan temperaturas inferiores a cero, en este caso entraría a funcionar el almacenamiento de nieve.

Almacenamiento de nieve **Ss**.

La precipitación es retenida en el tanque de nieve solo si la temperatura, **Temp**, es inferior a cero, mientras que para temperaturas mayores a cero su paso por el tanque se realiza directamente hacia el tanque superficial.

$$Si \quad Temp_{i-1} < 0 \quad \Rightarrow \quad Ss_i = Ss_{i-1} + P_{i-1} \quad 3.1$$

$$Si \quad Temp_{i-1} > 0 \quad \Rightarrow \quad Ss_i = Ss_{i-1} - P_{i-1}$$

Almacenamiento superficial **U**.

La humedad interceptada por la vegetación, el agua retenida en las depresiones y en la parte cultivada superior del suelo es representada por el tanque superficial, donde **Umax** da el límite superior para la cantidad de agua en el almacenamiento superficial.

$$Si \quad Temp_{i-1} > 0 \quad \Rightarrow \quad U_i = U_{i-1} + P_{i-1} - Ep_{i-1} - QIF_{i-1} - Pn_{i-1} + Ps_{i-1} \quad 3.2$$

$$Si \quad Temp_{i-1} > 0 \quad \Rightarrow \quad U_i = U_{i-1} - Ep_{i-1} - QIF_{i-1} - Pn_{i-1}$$

Almacenamiento inferior o zona de raíces **L**.

La humedad del suelo en la zona de raíces, corresponde a la capa del suelo bajo, la superficie de la cual la vegetación puede extraer agua por transpiración, es representado como la zona de almacenamiento inferior; **Lmax** corresponde al

limite superior para la cantidad de agua en este tanque. La humedad en el tanque inferior, **L**, esta expuesta a perdidas por transpiración, y también controla la cantidad de agua que entra al almacenamiento subterráneo como recarga. Es un valor muy sensible en la optimización del modelo ya que controla varios de los procesos que se dan al interior de la estructura de NAM.

$$L_i = L_{i-1} + DL_{i-1} - Ea_{i-1} \quad 3.3$$

Contribución del almacenamiento de nieve al sistema Ps.

Toma el valor mínimo entre:

$$\begin{aligned} & Ss, \quad y \\ Si \quad Temp_{i-1} > 0 & \Rightarrow C_{melt} \times Temp \quad 3.4 \\ Si \quad Temp_{i-1} < 0 & \Rightarrow 0 \end{aligned}$$

Evapotranspiración potencial calculada Ep.

Toma el valor mínimo entre:

$$\begin{aligned} U + Ps + P & \quad y \quad 3.5 \\ Epot \end{aligned}$$

Aporte de flujo subsuperficial QIF.

La contribución del flujo subsuperficial, **QIF** se supone proporcional a la **U** y varia linealmente con la humedad contenida en la zona de almacenamiento inferior.

Toma el valor mínimo entre:

$$\begin{aligned} U + Ps - Ep + P & \quad y \quad 3.6 \\ Si \quad \frac{L}{L_{max}} > CLIF & \Rightarrow \frac{CQIF \times U \times \left(\frac{L}{L_{max}} - CLIF \right)}{1 - CLIF} \quad 3.7 \end{aligned}$$

$$Si \quad \frac{L}{L_{max}} \leq CLIF \quad \Rightarrow \quad 0$$

donde,

CQIF, es el coeficiente para el flujo subsuperficial.

CLIF, es el valor límite de la zona de raíces para el flujo subsuperficial
($0 \leq CLIF \leq 1$).

Exceso de agua P_n.

Este se presenta cuando se excede el almacenamiento superficial.

Toma el valor máximo entre:

$$Si \quad Temp > 0 \quad \Rightarrow \quad U + P + P_s - Ep - QIF - U_{max} \quad 3.8$$

$$Si \quad Temp < 0 \quad \Rightarrow \quad U - Ep - QIF - U_{max}$$

Flujo superficial QOF.

Cuando el almacenamiento superficial es excedido, $U \geq U_{max}$, el exceso de agua, **P_n** aporta al flujo superficial como también a la infiltración. **QOF** representa la parte de **P_n** que contribuye al flujo superficial. Esta es asumida como proporcional a **P_n** y varía linealmente con el contenido de humedad en el suelo, **L**, en la zona de almacenamiento inferior.

Toma el valor mínimo entre:

$$Si \quad \frac{L}{L_{max}} > CLOF \quad \Rightarrow \quad \frac{U + P_s - Ep + P \quad y \quad P_n \times CQOF \times \left(\frac{L}{L_{max}} - CLOF \right)}{1 - CLOF} \quad 3.9$$

$$Si \quad \frac{L}{L_{max}} < CLOF \quad \Rightarrow \quad 0$$

donde,

CQOF, es el coeficiente de escorrentía de flujo superficial ($0 \leq CQOF \leq 1$).

CLOF, es el valor límite para que se produzca flujo superficial ($0 \leq CLOF \leq 1$).

La parte de precipitación neta que no se escurre como flujo superficial se infiltra hacia la zona de almacenamiento inferior que representa la zona de raíces. Una parte, **DL**, de la cantidad de infiltración, ($P_n - QOF$) incrementa el contenido de humedad, **L** en la zona de almacenamiento inferior. La cantidad restante de la humedad infiltrada, **G** percola en profundidad y recarga el almacenamiento subterráneo.

*Evapotranspiración actual **Ea**.*

Las demandas de evapotranspiración son asumidas inicialmente por la tasa potencial del almacenamiento. Si el contenido de humedad **U**, en el almacenamiento superficial es inferior al requerido, se asume que la parte restante es drenada por la actividad de las raíces desde el tanque inferior y a una tasa actual **Ea**, donde **Ea** es proporcional a la evapotranspiración potencial, **Ep**. El algoritmo usa el valor mínimo entre:

$$E_a = E_p \frac{L}{L_{\max}} \quad \text{y} \quad 3.10$$

$$E_{pot} - E_p$$

*Aporte al almacenamiento subterráneo **G**.*

El algoritmo utiliza la siguiente condición:

$$\text{Si } \frac{L}{L_{\max}} > CLG \Rightarrow \frac{(P_n - QOF) \times \left(\frac{L}{L_{\max}} - CLG \right)}{1 - CLG} \quad 3.11$$

$$Si \quad \frac{L}{L_{\max}} < CLG \quad \Rightarrow \quad 0$$

donde,

CLG, es el valor limite para que se produzca la recarga del almacenamiento subterráneo.

Infiltración en la zona de raíces DL.

La cantidad de infiltración que aporta humedad a la zona de raíces es calculada de la siguiente forma. El algoritmo toma el valor máximo entre:

$$\frac{P_n - QOF - G}{0} \quad y \quad 3.12$$

Salida resultante de la unión del flujo superficial y subsuperficial QR1.

Para el cálculo de las salidas se utiliza una simplificación de transito por tanque lineal de la siguiente forma:

$$QR1 = QR1_{i-1} \times e^{-\frac{1}{CK1}} + (QOF + QIF) \times \left(1 - e^{-\frac{1}{CK1}}\right) \quad 3.13$$

donde,

CK₁, es la constante para el transito del flujo superficial y subsuperficial.

Componente superior del flujo subterráneo BFU1.

$$BFU1_i = BFU1_{i-1} \times \left(e^{-\frac{1}{CKBFU}}\right) + \left(G \times (1 - CBFL) \times \left(1 - e^{-\frac{1}{CKBFU}}\right)\right) \quad 3.14$$

donde,

CKBFU, es la constante de tiempo para el flujo subterráneo superior.

Componente inferior del flujo subterráneo **BFL1**.

$$BFL1_i = BFL1_{i-1} \times \left(e^{-\frac{1}{CKBFL}} \right) + \left(G \times CBFL \times \left(1 - e^{-\frac{1}{CKBFL}} \right) \right) \quad 3.15$$

donde,

CKBFL, es la constante de tiempo para el flujo subterráneo inferior.

Flujo total **QR2**.

Es la salida final del modelo, en donde se integran los distintos aportes hechos por los almacenamientos.

$$QR2_i = QR2_{i-1} \times \left(e^{-\frac{1}{CK2}} \right) + \left(QR1 \times BFU1 \times BFL1 \times \left(1 - e^{-\frac{1}{CK2}} \right) \right) \quad 3.16$$

donde,

CK₂, es la constante de transito del flujo total.

En la tabla 3.1, se presenta una descripción general de los parámetros que hacen parte de las funciones del modelo NAM.

Tabla 3.1. Parámetros usados por el modelo NAM.

PARAMETRO	RANGO	DESCRIPCION
L_{max}	> 0	Máximo contenido de agua en la zona de almacenamiento inferior. L_{max} puede ser interpretado como el máximo contenido de agua en la zona de raíces disponible para transpiración por la vegetación. (mm).
U_{max}	> 0	Máximo contenido de agua en el almacenamiento superficial. Este contiene el agua almacenada en depresiones, además de la interceptación y el agua contenida en una capa superior de suelo de pocos centímetros. (mm); una primera estimación puede ser $0.1L_{max}$.
C_{melt}	> 0	Coefficiente de derretimiento de nieve.
CQOF	$0 - 1$	Coefficiente de escorrentía de flujo superficial. Este parámetro determina la distribución del exceso de precipitación en flujo superficial e infiltración. Valores pequeños en cuencas planas y altos para cuencas con suelo con poca permeabilidad.
CLOF	$0 - 1$	Valor limite para el flujo superficial. El flujo superficial solo se produce cuando la humedad relativa contenida en el almacenamiento inferior supera el valor de CLOF.
CQIF	$0 - 1$	Constante para el flujo subsuperficial. CQIF determina junto con U la cantidad de flujo subsuperficial. En cuencas con topografía plana el valor es muy cercano a cero.
CLIF	$0 - 1$	Valor limite para el flujo subsuperficial (interflow). Este flujo se genera si la humedad relativa en el almacenamiento inferior es mayor a CLIF.
CLG	$0 - 1$	Valor limite para la recarga. La recarga del almacenamiento de agua subterránea se produce solo si la humedad relativa en el almacenamiento inferior es mayor que CLG.
CBFL	$0 - 1$	Coefficiente de flujo de agua subterránea.
Constantes de tiempo para el flujo.		
CK_1	> 0	Constante para el transito del flujo superficial y subsuperficial. El transito de estos flujos se produce a través de un tanque lineal con constante CK_1 .
CK_2	> 0	Constante de transito del flujo total. Su transito se realiza a través de un tanque lineal con constante CK_2
CKBFU	> 0	Constante de tiempo para el flujo subterráneo superior.
CKBFL	> 0	Constante de tiempo para el flujo subterráneo inferior.

4 APLICACIÓN, CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO.

La calibración es el proceso iterativo mediante el cual se ajustan las variables que influyen en el ciclo hidrológico como la precipitación, evapotranspiración y la escorrentía. El proceso de calibración de un modelo consiste en generar un ajuste en ciertos parámetros, con el fin de lograr que los resultados del modelo sean lo más parecidos a los valores en el punto de control. Por su parte la validación del modelo es el proceso en el que se prueban los datos y los valores de los parámetros obtenidos en la calibración, modelando para otra serie de tiempo distinta a la de la calibración.

4.1 APLICACIÓN DEL MODELO.

La aplicación del modelo NAM en la cuenca se realizó en el periodo comprendido entre los años 2002 y 2004, asumiendo dos consideraciones: la primera que se aplicó el modelo a nivel de cuenca y la segunda a nivel de subcuencas, es decir, en la primera consideración se asumió a la cuenca como una sola área y en la segunda se consideró a la cuenca como la suma de tres áreas que corresponden a las subcuencas Río de Oro Alto, Río de Oro Bajo y Río Frío (ver figura 1.2).

Como no poseemos registros de caudales en las subcuencas, no sabemos el aporte real de cada una de estas al río, por lo tanto, para la segunda consideración el tránsito del flujo se consideró lineal y continuo y se ponderó el aporte hecho por cada subcuenca en función del área de cada una de estas al área total de la cuenca.

La conceptualización del modelamiento hidráulico del río se esquematiza en la figura 4.1.

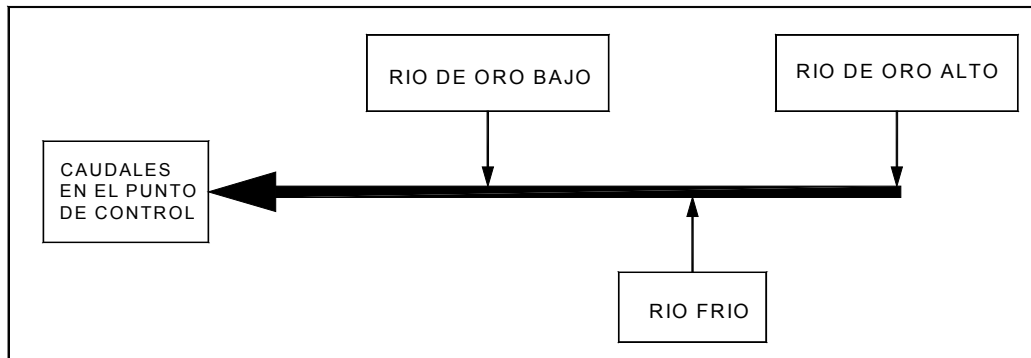


Figura 4.1. Esquema Hidráulico del Río de Oro para la aplicación del modelo por Subcuencas.

4.2 CALIBRACION.

La calibración se realiza cambiando los valores de los parámetros y observando como varia el comportamiento del modelo utilizando herramientas estadísticas, matemáticas (Nash-Sutcliffe, Mínimos Cuadrados) y computacionales para encontrar el valor que mejor se ajuste al funcionamiento del modelo.

Es necesario tener en cuenta tres factores que juegan un papel muy importante en el proceso de calibración: primero la elección de los parámetros de calibración, segundo la elección de los datos de control (valores reales) y tercero la elección del modo de la evaluación de la calibración (Izasa, 2004).

4.2.1 Parámetros de la Calibración.

Los parámetros para la calibración, son aquellos elementos del ciclo hidrológico que están incluidos en el modelo y que se pretenden ajustar comparando la respuesta del modelo con los datos reales de caudal medidos directamente en las estaciones.

Los parámetros para la calibración contenidos en el modelo NAM, están descritos con mas detalles en el capítulo 3 en la tabla 3.1.

4.2.2 Datos de Control.

Los datos de control para el modelo aplicado en la cuenca se tomarán de la serie de tiempo de caudales diarios para la cuenca del Río de Oro, obtenida en el capítulo 2.

La serie de tiempo de caudales de la cuenca que se utilizaron para la calibración corresponde al año 2004, esto debido a que este año solo presenta dos registros de datos faltantes. Por su parte la validación se efectuará en el año 2002 y 2003. Cabe anotar que el año 2002 presenta un irregular comportamiento en los datos, debido a que posee un gran porcentaje de datos faltantes que nos genera mucha incertidumbre en los datos generados.

A continuación se presenta la serie de tiempo de caudales contra precipitación para el año 2004 utilizadas en la calibración.

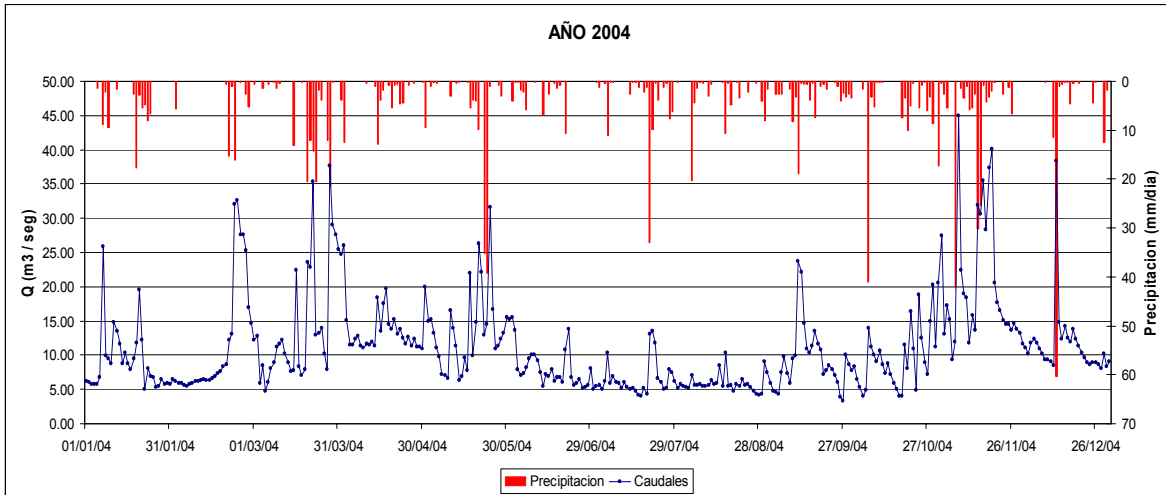


Figura 4.2. Serie de tiempo de Caudales vs Precipitación del año 2004.

4.2.3 Control de la Calibración.

Con el propósito de evaluar la correlación existente entre los caudales reales y los simulados por el modelo, a efecto de realizar el proceso de calibración se utilizó el coeficiente de Nash – Sutcliffe, (1970), que es una función de error tratada en el capítulo 2 del presente proyecto y está dada por la expresión:

$$Nash - Sutcliffe = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_j)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad 4.2$$

Donde:

Q_i = Caudales reales medidos en la estación de aforo.

Q_j = Caudales calculados por el modelo.

\bar{Q}_i = Valor del caudal promedio medido en la estación de aforo.

N = Numero Total de Datos.

El ajuste de los datos será mejor en cuanto el coeficiente de Nash – Sutcliffe se acerque a 1, para valores negativos el ajuste es muy malo.

El valor del coeficiente obtenido por el proceso de calibración del modelo para la consideración a nivel de cuenca fue de 0.414 (41.4%) y a nivel de subcuenca de 0.404 (40.4%), este es un ajuste de los datos medianamente bueno, teniendo en cuenta la cantidad escasa y la baja calidad de los datos hidrológicos y climáticos que se utilizaron.

Cabe anotar que ningún modelo hidrológico por muy bueno y sofisticado que sea nunca tendrá un ajuste perfecto de los datos simulados a los medidos en el punto de control.

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran los hidrogramas de los caudales medidos y los simulados para el año de calibración del modelo a nivel de cuenca y subcuencas.

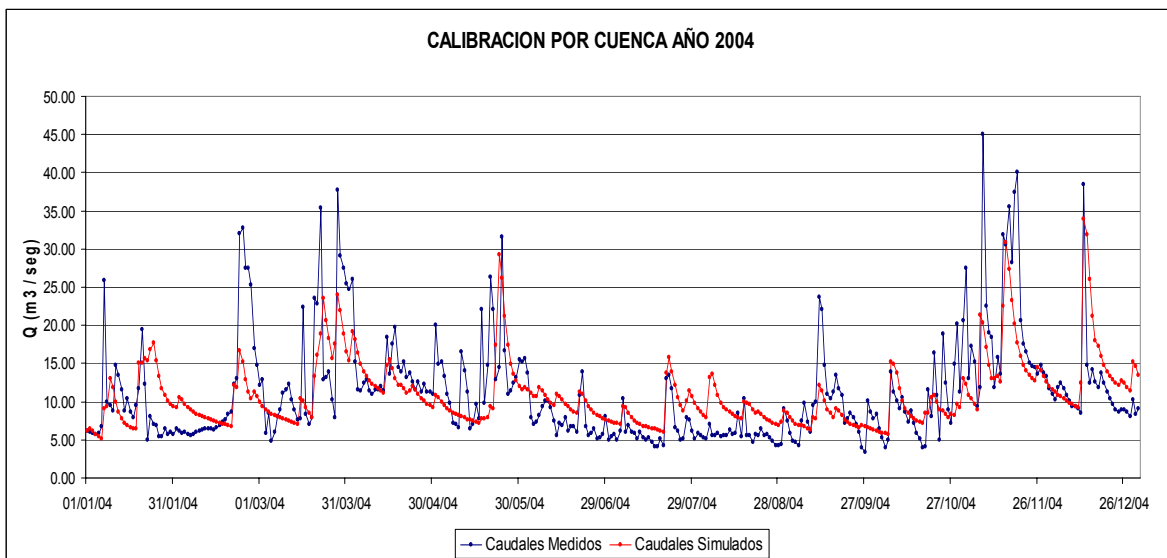


Figura 4.3. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la calibración a nivel de cuenca.

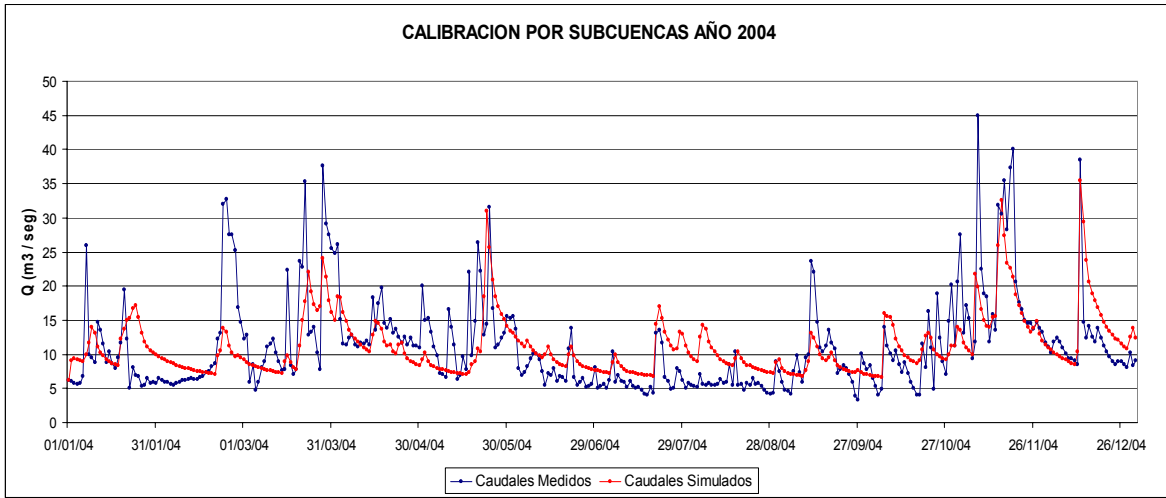


Figura 4.4. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la calibración a nivel de Subcuencas.

A continuación se muestran los parámetros del modelo NAM resultantes de la calibración.

Tabla 4.1. Parámetros calibrados por el modelo NAM. A nivel de cuenca.

PARAMETRO	ENTRADA	CALIBRACION POR CUENCA	CALIBRACION POR SUBCUENCAS		
			Oro Alto	Oro Bajo	Río Frío
L _{max}	120	182	410	357	471
U _{max}	12	0.22	4.3	0.1	14.92
C _{melt}	0.2	0	0	0	0
CQOF	0.3	0.27	0.03	0.06	0.044
CQIF	0.025	0.005	0.132	0.45	0.038
CBFL	0.2	0.006	0.31	0.52	0.13
CLIF	0	0.85	0.0011	0.005	0.0047
CLOF	0.6	0.016	0.0012	0.005	0.005
CLG	0.2	0.005	0.002	0.005	0.061
CK ₁	2	1.05	0.44	0.72	0.46
CK ₂	2	1.36	0.59	0.72	0.83
CKBFU	10	29.6	4036	14.23	587
CKBFL	150	1705	11.7	53947	7.32
VALORES INICIALES.					
S _s	0	0	0	0	0
U	0	160	2	0	0
L	110	130	190	230	110
QR ₁	0.3	0.6	0.1	0.03	0.05
BFU ₁	0.3	0.2	0.32	0.19	0.29
BFL ₁	0.3	0.55	0.3	0.32	0.03
QR ₂	0.6	0.89	0.31	0.39	0.186

4.3 VALIDACION DEL MODELO.

Como se indicó anteriormente para la validación del modelo se tomaron los años 2002 y 2003.

Para la validación se tienen en cuenta los ajustes de los parámetros arrojados en la calibración y simplemente se hacen coincidir con los parámetros de la validación y se compara el ajuste obtenido.

El control de la validación se realizara de la misma manera que en la calibración utilizando el coeficiente de Nash – Sutcliffe.

A continuación se muestran las series de tiempo de caudales medidos contra la precipitación en los años 2002 y 2003.

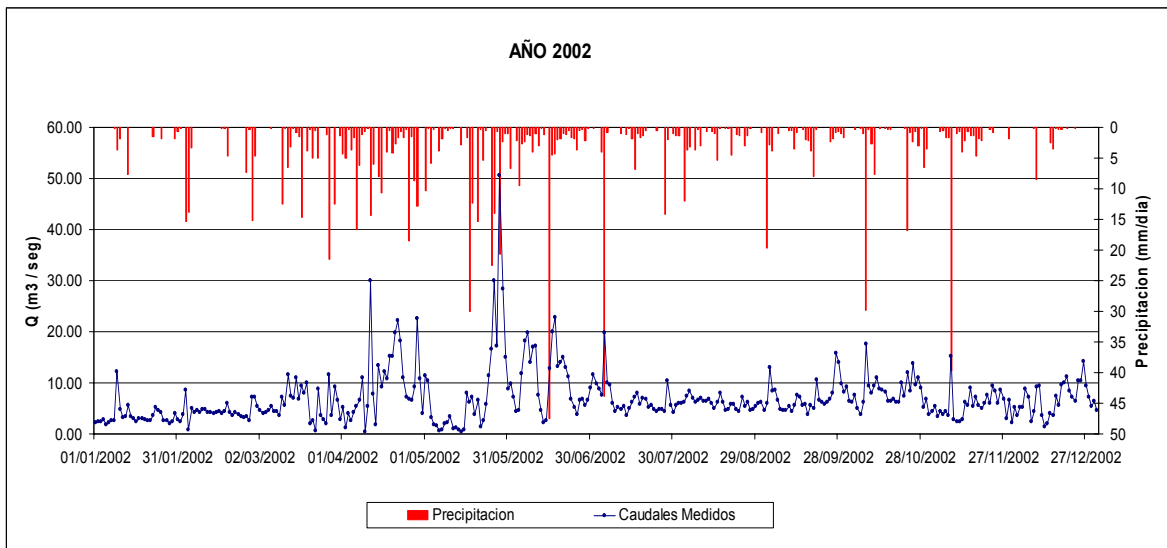


Figura 4.5. Serie de tiempo de Caudales vs Precipitación del año 2002.

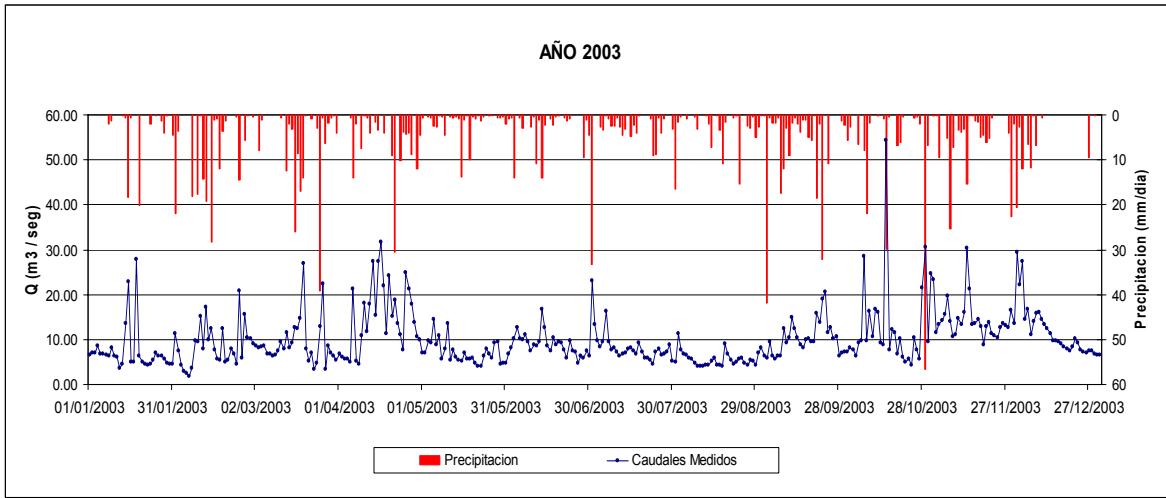


Figura 4.6. Serie de tiempo de Caudales vs Precipitación del año 2003.

El ajuste del coeficiente de Nash – Sutcliffe obtenido para el periodo de la validación a nivel de cuenca fue de 0.164 (16.4%) para el año 2002 y de 0.38 (38%) para el año 2003. Este es un valor esperado muy bueno, partiendo del resultado de la calibración presentado anteriormente.

En las graficas presentadas a continuación se muestran las series de tiempo de caudales resultado de la validación a nivel de cuenca junto con los datos de caudales medidos.

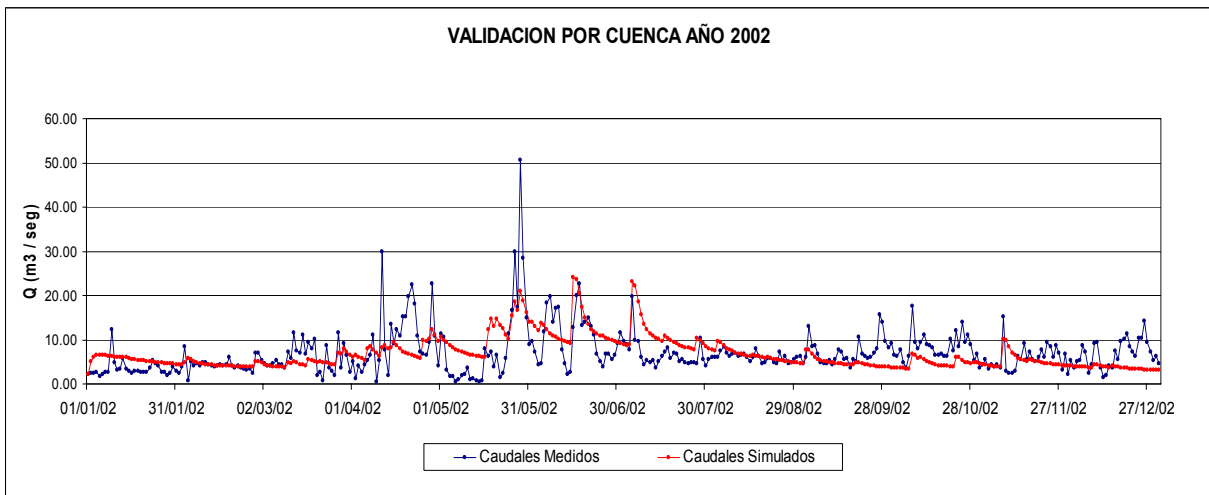


Figura 4.7. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de cuenca para el año 2002.

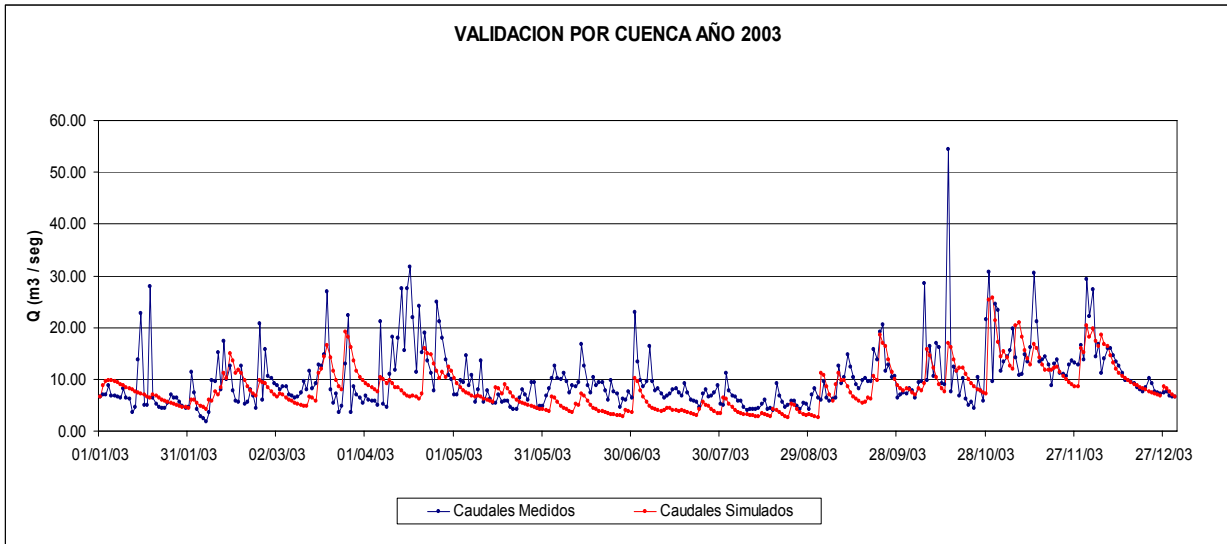


Figura 4.8. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de cuenca para el año 2003.

El ajuste del coeficiente de Nash – sutcliffe obtenido para el periodo de la validación a nivel de subcuencas fue de 0.278 (27.8%) para el año 2002 y de 0.178 (17.8%) para el año 2003.

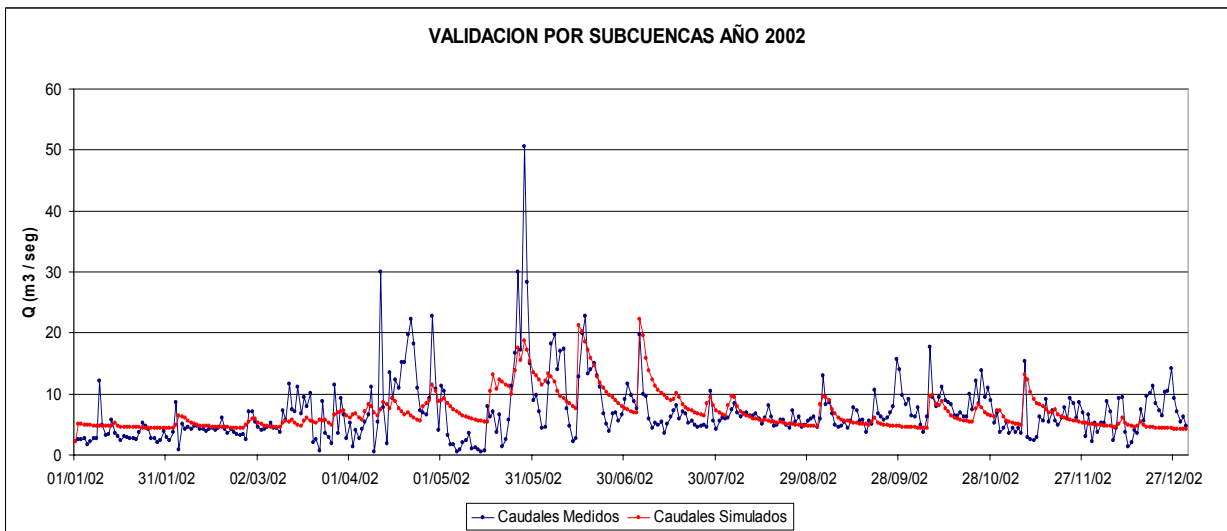


Figura 4.9. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de subcuenca para el año 2002.

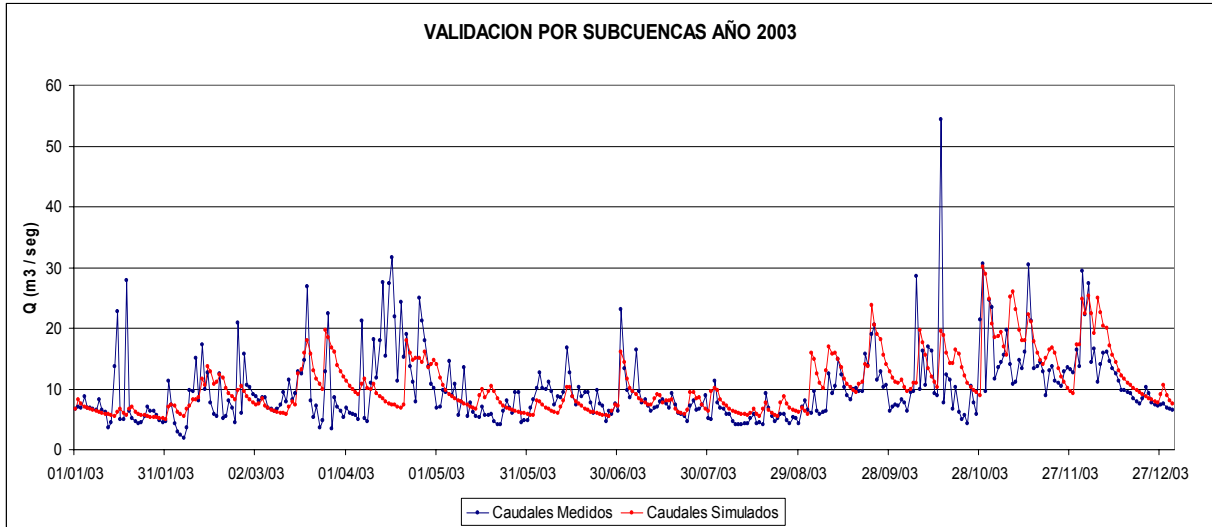


Figura 4.10. Hidrogramas de caudales Medidos y Simulados en la Validación a nivel de subcuenca para el año 2003.

Los parámetros del modelo NAM para la validación se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 4.2. Parámetros de la validación por el modelo NAM. A nivel de subcuencas.

PARAMETRO	VALIDACION POR CUENCA		VALIDACION POR SUBCUENCAS					
			2002			2003		
	2002	2003	Oro Alto	Oro Bajo	Río Frío	Oro Alto	Oro Bajo	Río Frío
L _{max}	182	182	410	357	471	410	357	471
U _{max}	0.22	0.22	4.3	0.1	14.92	4.3	0.1	14.92
C _{melt}	0	0	0	0	0	0	0	0
CQOF	0.27	0.27	0.03	0.06	0.044	0.03	0.06	0.044
CQIF	0.005	0.005	0.132	0.45	0.038	0.132	0.45	0.038
CBFL	0.006	0.006	0.31	0.52	0.13	0.31	0.52	0.13
CLIF	0.85	0.85	0.0011	0.005	0.0047	0.0011	0.005	0.0047
CLOF	0.016	0.016	0.0012	0.005	0.005	0.0012	0.005	0.005
CLG	0.005	0.005	0.002	0.005	0.061	0.002	0.005	0.061
CK ₁	1.05	1.05	0.44	0.72	0.46	0.44	0.72	0.46
CK ₂	1.36	1.36	0.59	0.72	0.83	0.59	0.72	0.83
CKBFU	29.6	29.6	4036	14.23	587	4036	14.23	587
CKBFL	1705	1705	11.7	53947	7.32	11.7	53947	7.32
VALORES INICIALES								
S _s	0	0	0	0	0	0	0	0
U	50	3.7	1	0	0	1	0	0
L	70	0	70	20	50	100	0	0
QR ₁	0.06	0.001	1	0.1	0.05	2	0.001	0.05
BFU ₁	0.23	1.6	0.2	0.05	0.2	0.12	0.29	0.2
BFL ₁	0.41	0.0001	0.05	0.23	0.001	0.1	0.32	0.07
QR ₂	0.32	0.95	0.112	0.141	0.067	0.33	0.42	0.2

En la tabla se muestra la comparación entre los datos de caudales medidos y los simulados por el modelo.

Tabla 4.3. Comparación de caudales máximos y mínimos medidos y simulados.

	2002		2003		2004	
	Medidos	Simulados	Medidos	Simulados	Medidos	Simulados
Máximo	50.62	24.07	54.41	25.79	45	33.91
Mínimos	0.43	2.22	1.86	2.63	3.22	5.18
promedios	6.93	6.83	9.92	8.27	11.09	10.89

➤ Hidrogramas de respuesta arrojados por el modelo a nivel de Cuenca contra la precipitación.

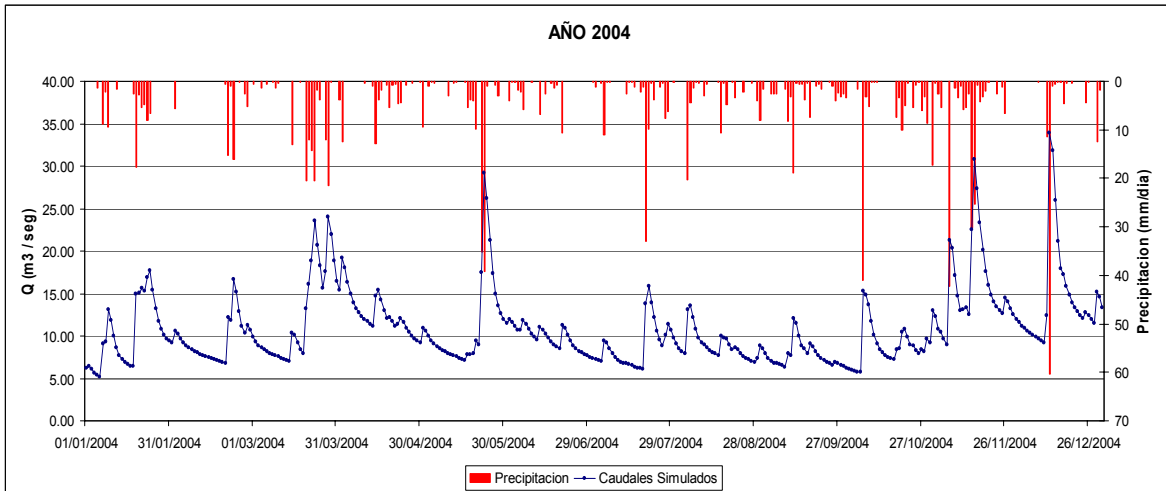


Figura 4.11. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2004 a nivel de cuenca.

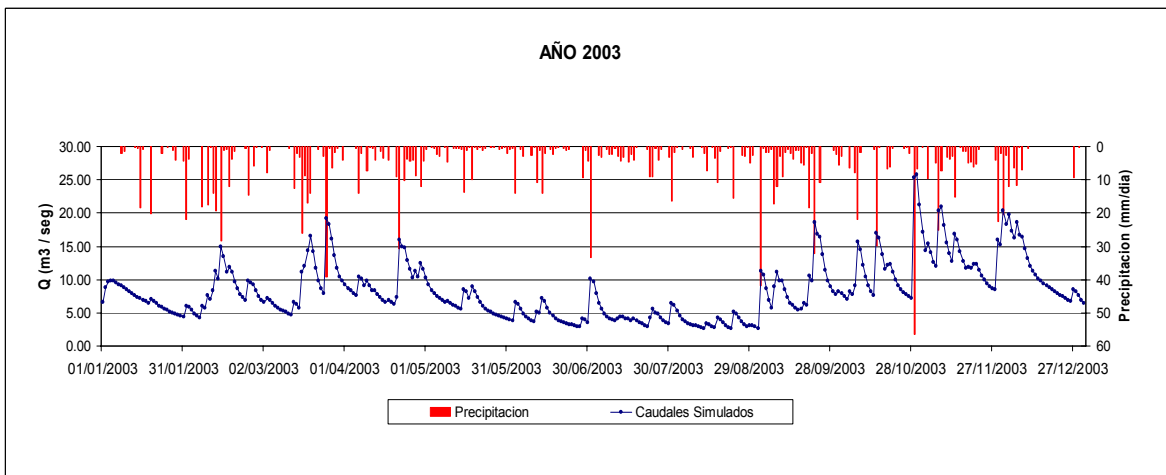


Figura 4.12. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2003 a nivel de cuenca.

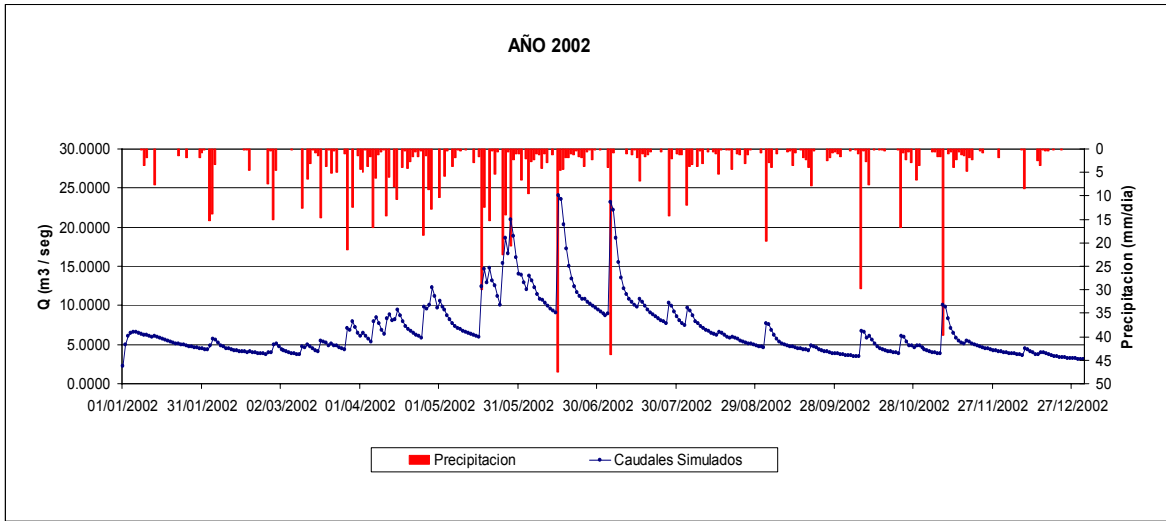


Figura 4.13. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de cuenca.

➤ Hidrogramas de respuesta arrojados por el modelo a nivel de Subcuencas contra la precipitación.

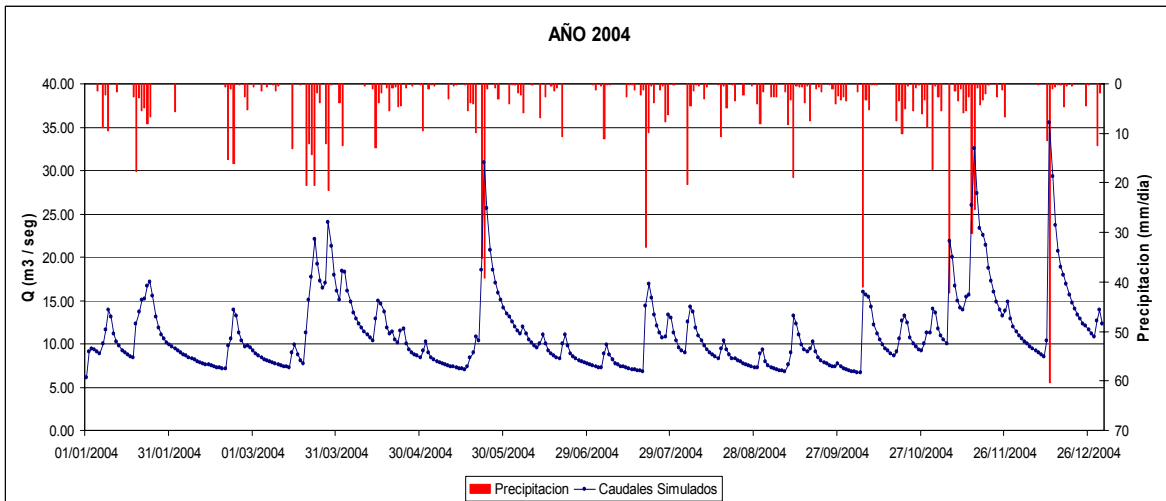


Figura 4.14. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de Subcuencas.

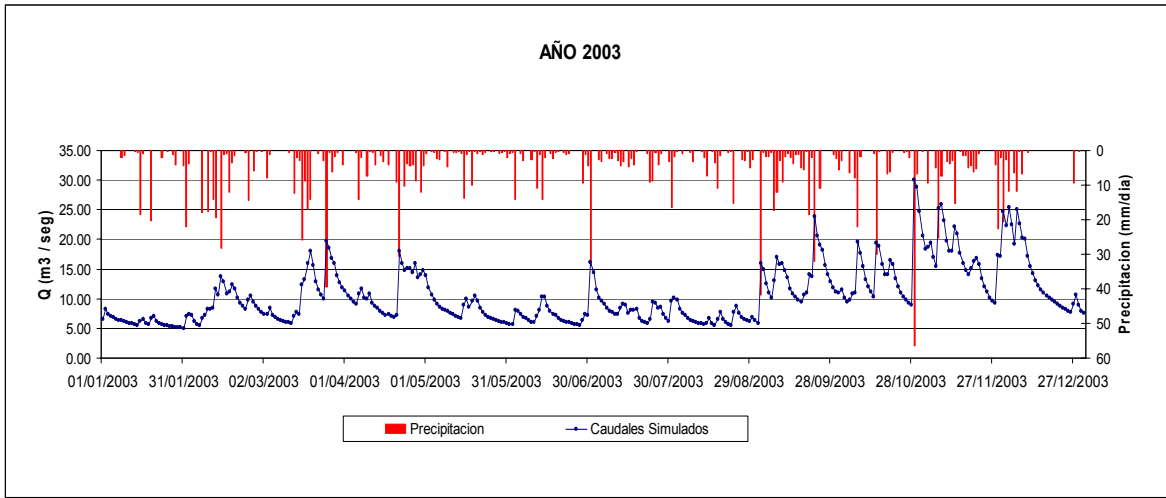


Figura 4.15. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de Subcuencas.

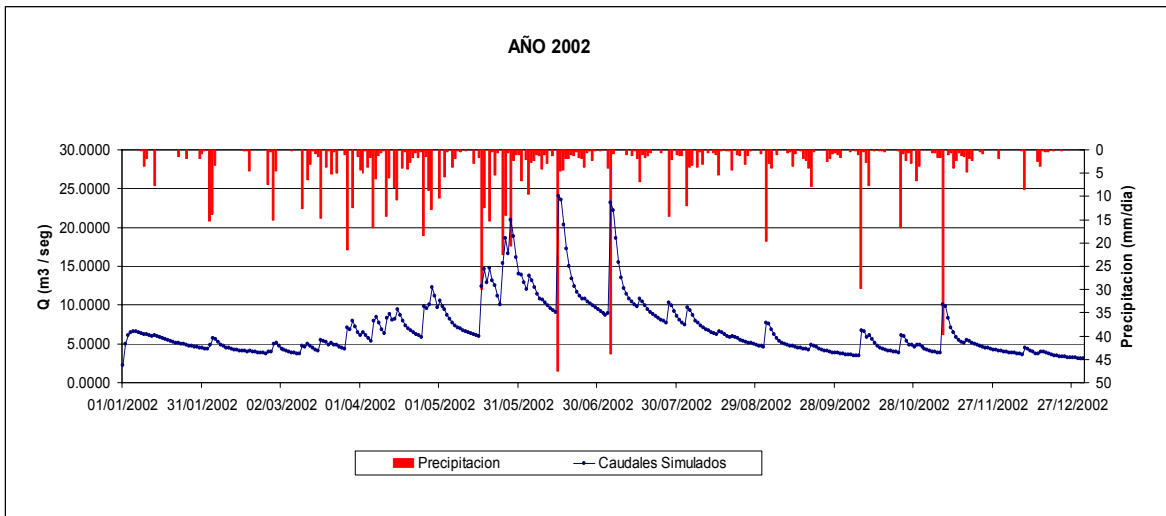


Figura 4.16. Hidrograma de caudales Simulados contra la precipitación en el año 2002 a nivel de Subcuencas.

CONCLUSIONES.

- La calibración del modelo se realizó en la cuenca del río de oro para el año 2004, el cual arrojó un coeficiente de ajuste Nash-Sutcliffe entre los caudales medidos y simulados de 0.414 a nivel de cuenca y 0.404 a nivel de subcuencas.
- La validación del modelo se aplicó igualmente a la cuenca del río de oro en los años 2002 y 2003, arrojando un coeficiente de ajuste para el año 2002 de 0.164 a nivel de cuenca y 0.278 a nivel de subcuencas. y para el año 2003 fueron de 0.38 y 0.178 a nivel de cuenca y subcuenca respectivamente. Los coeficientes de Nash-Sutcliffe en la validación presentaron un ajuste aceptable a nivel de cuenca a pesar de los resultados obtenidos en la calibración que no fueron los mejores.
- El valor bajo de los coeficientes de ajustes obtenidos como resultado del modelamiento se debe a:
 - los errores sistemáticos presentados en la medición de las series históricas utilizadas, además por que la serie de tiempo de caudales para la cuenca se obtuvo de la diferencia de caudales entre las estaciones Café Madrid y Majadas.
 - Debido a que solo se utilizaron estaciones ubicadas en la parte baja de la cuenca y no se contó con información en la parte alta de la cuenca en el macizo de Bucaramanga, por esta razón los valores de la precipitación fueron subestimados, mientras que la evapotranspiración potencial fue sobreestimada
- El modelo representó adecuadamente las mediciones de los caudales mínimos y caudales promedios, el tiempo al pico de los hidrogramas y la

curva de recesion de los mismos, pero mostró fallas con los registros de caudales máximos cuando se presentaron fuertes eventos de precipitación.

RECOMENDACIONES.

La gran limitante de este estudio fue la baja calidad, cantidad, inconsistencia y no-homogeneidad de los datos hidroclimáticos utilizados, por ende se recomienda:

- Que para la obtención de mejores resultados en el futuro las entidades encargadas de las estaciones hagan revisiones periódicas a los instrumentos con el fin de reducir el error sistemático que se presenta en la medición de los registros.
- Es necesaria la implementación de una red pluviométrica adecuada en la parte alta de la cuenca en el macizo de Bucaramanga, además del adecuado mantenimiento de las pocas estaciones presentes allí, debido a que esta zona presenta gran incertidumbre en el conocimiento de la información hidroclimática por el hecho de no existir estaciones con buenos registros históricos continuos y confiables.
- Para futuros estudios relacionados con el modelamiento hidrológico en la cuenca del Río de Oro, se tomen como un punto de partida y asimilar los aciertos y desaciertos que se tuvieron en este estudio, para la obtención de mejores resultados.

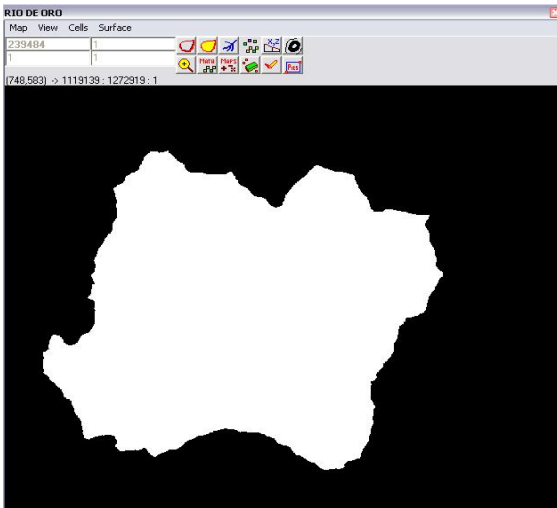
BIBLIOGRAFIA.

- APARARICIO, F., 1987. Fundamentos de hidrología de superficie., Noriega editores Limusa. p. 27-35.
- ARANDA, F., Valencia, L., 2004. Metodología para la construcción de modelos distribuidos aplicada a la hidrología. Tesis de Grado UIS.
- BLANCO, D., Gualdron, E., 2006. Modelos autorregresivos con variables exogenas aplicado a la cuenca superior del río Lebrija. Tesis de Grado UIS.
- BOX, G. P., Jenkins, G. M., 1976. Time series analysis forecasting and control. Editorial Holden-day. U.S.A.
- CHOW, V.T.; 1994. Hidrologia aplicada, Mc Graw Hill, Bogota, Colombia.
- CDMB. Series de tiempo de las estaciones Centro, Chimta, PTAR, UIS.
- DHI, 1999. NAM – Nedbor Afstromings Model. Simplified spreadsheet version. Instruction Manual. IHE
- Enviromental and Water Resources Institute of the American Society of Civil engineers, (Task Committee on Standarization of Reference Evapotranspiration) Final Report January, 2005.
- Food and agriculture organization of the united nations, (Allen et al., 1998). Crop evapotranspiration-Guideline for computing crop water requirements.
- GARCIA, S., Otero, J., 2005. Estimación de la Evapotranspiración real en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Tesis de Grado UIS.
- Golden Software. 1999. SURFER v 8.0
- GOMEZ, E., López, C., 2005. Estimación de la recarga mensual en la parte alta de la cuenca del Río Frío por medio de un modelo hidrológico distribuido. Tesis de Grado UIS.
- GUZMAN, J.A., Chu, Ma, 2002, SPELL Stat. Software para el análisis de series de tiempo. Sin publicar.
- GUZMAN, J.A., 2006, SPELL SDM. No publicado.
- GUZMAN, J.A., 2005, SPELL-map. V1.0.0.3. Software para el manejo de DEM. Sin publicar.

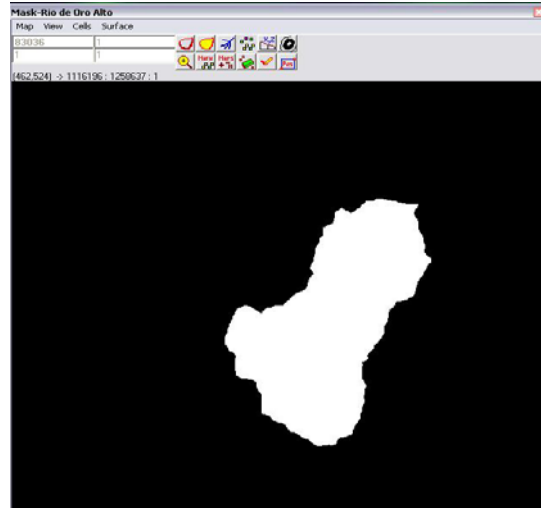
- GUZMAN, J.A., 2006, SPELL AMO. No publicado.
- GUZMAN, J, Gómez, S., Colegial, D., Anaya, A., Niño E., 2005. Cuenca Experimental del Río Sucio (CERS). Sin publicar.
- GUZMAN, J., Niño, E.V; 2005, NAM-gph v.1.0, software para el modelamiento hidrológico. Sin publicar.
- IDEAM. Series de tiempo de las estaciones Café Madrid, Majadas.
- IGAC. Planchas Cartográficas escala 1:25000.
- IZASA, O., 2004. Estimación de la recarga mensual en la cuenca del Río de Oro por medio de un modelo hidrológico distribuido.
- KEITH. J. BEVEN; 2003, Rainfall-runoff modelling, Wiley.
- MARADEI, Z., Rojas, J., 2002. Distribución espacial de variables hidrológicas en la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL) utilizando geoestadística. Tesis de Grado UIS.
- MENDOZA, R., Sandoval, R. Un estudio de oferta hídrica en la cuenca Superior del Río Lebrija. Tesis de Grado UIS.
- MONSALVE, G.; 1999. Hidrología en la ingeniería, Editorial Departamento de publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, segunda edición, Bogotá, Colombia.
- SERRANO, A., BALAGUERA, G., 2006. Separación de flujo base en la estación Café Madrid (C.S.R.L.). Tesis de Grado UIS
- Nash & Sutcliffe, 1970.

ANEXOS:

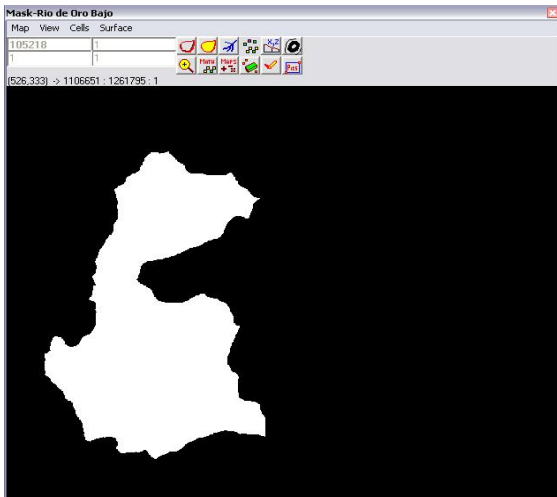
Anexo A: Mascaras utilizadas para la espacialización de la precipitación y la evapotranspiración en SPELL-Map.



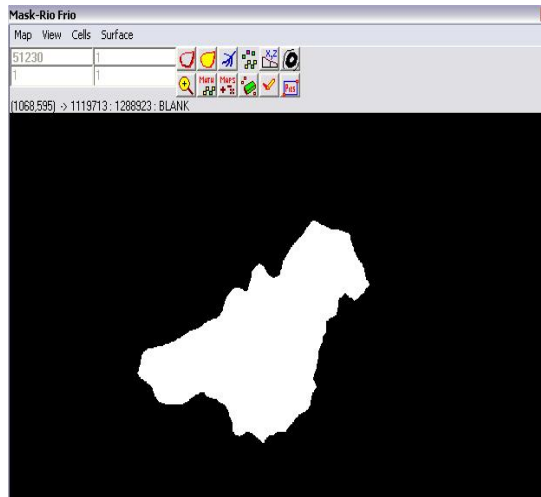
Mascara de la Cuenca del Río de Oro.



Mascara de la Subcuenca del Río de Oro Alto



Mascara de la Subcuenca del Río de Oro Bajo.



Mascara de la Subcuenca del Río Frío.

Figura A.1. Mascaras utilizadas para la espacialización de la precipitación y la evapotranspiración en SPELL-Map.